

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ POREZITY U TLAKOVĚ LITÝCH ODLITKŮ Z AL SLITIN

EVALUATION OF POROSITY IN AL-ALLOY DIE-CASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB STRAKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV ČECH, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Straka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků z Al slitin

v anglickém jazyce:

Evaluation of porosity in Al-alloy die-castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků, případně míst s lokálním dotlačováním, u slitiny AlSi9Cu3. Stanovení u konkrétního odlitku - tlakově litého bloku motoru.

Cíle diplomové práce:

Stanovení porezity tlakově litých odlitků ze slitiny AlSi9Cu3. Výběr reprezentativního představitele - odlitku bloku motoru. Porovnání mechanických a strukturních vlastností tlakově litého odlitku.

Seznam odborné literatury:

1. MICHNA, S., aj. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Děčín: ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
2. ROUČKA, J. Metalurgie neželezných slitin. Skripta VUT. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
3. PTÁČEK, L., aj. Nauka o materiálu I. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 503 s. ISBN 80-7204-193-2.
4. ČECH, J., aj. Predikce pórovitosti a mikrostruktury u tlakově litého odlitku z Al slitiny pomocí simulace a experimentu. Slévárenství. Leden 2010, roč. LVIII, č. 1-2, s. 83-94. ISSN 0037-6825.
5. BARTES, F. Jakost v podniku. Skripta VUT. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 89 s. ISBN 978-80-214-3362-5.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je hodnocení porezity u tlakově litých odlitků, popřípadě míst s lokálním dotlačováním v závislosti na mechanických a strukturních vlastnostech. Vzorky ze slitiny AlSi9Cu3 byly odebrány z bloku motoru vyrobeného v podniku Škoda Auto, a.s. Mladá Boleslav. K vyhodnocení a porovnání výsledků byla použita včetně vlastních dat porezity i data z předchozích diplomových prací Vysokého učení technického v Brně. Soubory dat mechanických a strukturních vlastností byly roztríděny, studovány a podrobeny testům na odhalení statistických chyb.

Klíčová slova

Tlakové lití, lokální dotlačování, AlSi9Cu3, mechanické vlastnosti, obrazová analýza, porezita

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is an evaluation of die-castings porosity, eventually the evaluation of seats with local squeeze in connection with their mechanical and structural properties. The swatches of alloy AlSi9Cu3 were taken from the engine block made by Škoda Auto Company, Mladá Boleslav. To the evaluation and the comparison of the results there were used value of porosity with own measure and other student's thesis of Brno University of technology. Sets of mechanical and structural properties were selected, evaluated and tested by statistical programs.

Key words

Die casting, local squeeze casting, AlSi9Cu3, mechanical properties, image analysis, porosity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRAKA, J. *Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků z Al slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 64. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků z Al slitin vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 26.5. 2011

.....
Bc. Jakub Straka

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Jaroslavu Čechovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Děkuji také paní Aleně Málkové, Ing. Markétě Říhové a Ing. Pavlu Gejdošovi za pomoc s vypracováním experimentální části.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	7
Cíle Diplomové práce.....	8
1. TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1.1 Hliník.....	9
1.2 Přehled slévárenských hliníkových slitin.....	9
1.2.1 Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706.....	9
1.2.2 Slitiny typu Al-Si-Cu.....	11
1.2.3 Slitina AlSi9Cu3(Fe).....	11
1.3 Lití pod tlakem.....	13
1.4 Tlakové licí stroje.....	14
1.4.1 Stroje pro tlakové lití s teplou komorou.....	15
1.4.2 Stroje pro tlakové lití se studenou komorou.....	16
1.5 Fáze plnění dutiny formy při tlakovém lití.....	17
1.6 Čtvrtá fáze plnění dutiny.....	18
1.7 Lití s krystalizací pod tlakem.....	18
1.8 Rozdělení metod squeeze casting.....	19
1.8.1 Přímý squeeze casting.....	19
1.8.2 Nepřímý squeeze casting.....	19
1.8.3 Lokální squeeze casting.....	20
1.9 Výhody a nevýhody squeeze castingu.....	20
1.10 Pórovitost v odlitcích.....	21
1.11 Rozpuštěnost vodíku v hliníkových slitinách.....	22
1.12 Pórovitost a kvalita.....	27
1.13 Pórovitost z hlediska tvaru pórů.....	28
1.14 Krystalizace kovů při zvýšeném tlaku.....	29
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	33
2.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti AlSi9Cu3.....	33
2.2 Zkoumané odlitky.....	33
2.3 Výběr vhodného místa ke zkouškám.....	34
2.4 Značení a zhotovení vzorků.....	37
2.5 Příprava metalografických vzorků.....	38
2.6 Hodnocení porezity.....	41
2.7 Vyhodnocení měření.....	43
2.7.1 Vyhodnocení měření pro díl litý bez LSC.....	45
2.7.2 Diskuze výsledků k měření pro díl litý bez LSC.....	49
2.7.3 Vyhodnocení měření pro díl litý s LSC.....	49
2.7.4 Diskuze výsledků k měření pro díl litý s LSC.....	54
2.8 Statistické vyhodnocení porezity.....	54
2.9 Vyhodnocení celého měření.....	56
3. Závěr.....	59
Seznam použitých zdrojů.....	61
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	63
Seznam příloh.....	63

ÚVOD

V dnešní moderní době je automobil nedílnou součástí našeho každodenního života, a tak se výrobci snaží vyrábět poměrně velká kvanta aut. Automobil jako dopravní prostředek musí splňovat celou řadu předpisů a norem, které souvisí s bezpečností, spolehlivostí, technickou vybaveností vozu a dalšími faktory, jako např. snižování spotřeby pohonných hmot nebo snížení hmotnosti vozu. To přináší celou řadu dalších úskalí v podobě např. změny materiálu, a to zejména v nahrazení slitin železa lehkými slitinami a v zavádění nových materiálů a technologií, kterými je možné vytvářet cenově dostupné, součástky s vysokými mechanickými vlastnostmi a vysokou spolehlivostí. S vyšší spolehlivostí se však zvyšují i požadavky na odlitky z lehkých slitin.

V automobilovém průmyslu, resp. ve výrobě odlitků z hliníku hraje důležitou roli tlakové lití, kterým se téměř výhradně odlévají bloky motorů, převodovek a dalších součástí. Jeho nespornou výhodou je výroba velmi složitých tenkostěnných odlitků, které není možné jinou technologií vyrobit a navíc ve velkém množství za poměrně krátkou dobu. Ovšem tak jak se i v jiných odvětvích potvrzuje pravidlo, že vše má své výhody i nevýhody, tak ani tlakové lití není výjimkou. Poměrně velkou nevýhodou tlakového lití je porezita odlitků, ke které je práce vztažena a se kterou bojuje většina sléváren tlakového lití. Právě se zvyšujícími požadavky na kvalitu odlitků je nutné zlepšit samotnou technologii, aby bylo možné vysokým nárokům na materiál a samotnou technologii vyhovět. Proto se používají různé modifikace tlakového lití jako jsou např. lití s krystalizací pod tlakem (squeeze casting), lití a tváření v polotekutém stavu (thixocasting a thixoforming nebo semi-solid metal casting). Jak lití s krystalizací, tak lití v polotekutém stavu umožňují zvýšit mechanické vlastnosti odlitků na úroveň tvářených materiálů a dosáhnout vysoké výrobní rychlosti, tvarové přesnosti a vysokého využití materiálu. A právě bloky motoru, se kterými je v práci udělán rozbor porezity byly odlity ve slévárně Škoda Auto Mladá Boleslav metodou tlakového lití s lokálním dotlačováním (squeeze casting) v místech uložení ložisek klikové hřídele a metodou tlakového lití bez lokálního dotlačování.

Práce se dělí na část teoretickou a experimentální. V teoretické části je popsána charakteristika hliníkových slitin, zejména siluminů a slitiny AlSi9Cu3, ze které jsou bloky motoru odlévány. Dále je popsána technologie tlakového lití včetně metod squeeze castingu, a to proto, že je s nimi dále pracováno v experimentální části. Jelikož je práce zaměřena na měření porezity, tak je v teoretické části popsána i pórovitost a její vliv na mechanické vlastnosti odlitků.

V experimentální části bylo nutné nejprve odebrat vzorky u obou typů odlitků a z těchto vzorků zhotovit zkušební tyče pro tahové zkoušky, zkoušku únavy a pro zkoušku rázem v ohybu. Tyto zkoušky byly provedeny J. Lefnerem [6].

Z přetržených tahových tyčí se zhotovily metalografické výbrusy, na kterých proběhla studie porezity. Zhotovení vzorků opět prováděl J. Lefner [6].

Vzorky bylo však třeba přeleštit pro následné měření, které se od předchůdců liší. Získané výsledky byly statisticky testovány a jejich výsledky jsou v práci uvedeny v podobě tabulek a také grafů, z nichž některé jsou umístěny v přílohách. Na závěr se veškeré zkoušky graficky vyhodnocovaly. Technické podrobnosti a specifikace použitého zařízení, přístrojů či softwaru, který byl použit pro vyhodnocení jsou zmíněny v textu práce.

CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Mým prvním cílem je srovnat mechanické a strukturní vlastnosti v místech uložení klikové hřídele u obou litých dílců stávajícího (s LSC) i nového bloku motoru (bez LSC) a navázat tak na předešlé práce studentů FSI VUT v Brně, od kterých byla použita část dat.

Dalším cílem je ukázat jak se tyto technologie od sebe liší a která je vhodnější pro výrobu. Na základě provedených mechanických zkoušek a strukturních studií vypracovat závěrečné zhodnocení.

Pro statistické vyhodnocení veškerých veličin bude využito programu Minitab v.14. Pro hodnocení (obrazovou analýzu) porezity bude použito softwaru Stream motion od firmy Olympus a programu Excel pro zpracování a porovnání dílčích výsledků.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Hliník

Hliník je přítomen ve všem co nás obklopuje. Je třetím nejrozšířenějším prvkem na zemi a setkáváme se s ním v nejrůznějších odvětvích, v každodenním životě. Hliník tedy ovlivňuje náš životní styl mnohými způsoby a v současnosti výrobky z hliníku nalézají využití v široké škále aplikací, přičemž splňují nároky na funkčnost i estetiku. Je třeba poukázat na to, že hliník je z hlediska průmyslového použití poměrně mladý kov a s jeho využitím se začalo přibližně před 100 lety. V roce 1825 Oerstedt získal malé množství hliníku redukcí chloridu hliníku amalgámem draslíku, ale jako zrod průmyslové výroby hliníku je považován rok 1886, kdy Heroult s Halleem objevili možnost výroby hliníku elektrolyzou. Po tomto objevu přešla ještě další desetiletí, než začala jeho první průmyslová výroba. V počátcích bylo hliníku málo, a proto byl dokonce dražší než zlato. Ovšem se zvyšující výrobou jeho cena postupně klesala a jeho použití se rozšiřovalo. Největšího nárůstu bylo zaznamenáno po 2. světové válce. V dnešní době se hliníkem a jeho slitinami nahrazují jiné materiály. [1]

V tabulce 1 je naznačeno využití a celosvětová spotřeba hliníku a jeho slitin v roce 2002 v jednotlivých odvětvích průmyslu. Z tabulky je patrné, že téměř 60 % celosvětové produkce se spotřebuje v oblasti dopravy. [1]

tab. 1 Celosvětová spotřeba hliníku a jeho slitin v jednotlivých odvětvích v roce 2002 [1]

Odvětví	Spotřeba [%]
Doprava (letecká, lodní, železniční, automobilová)	59.1
Stavebnictví	18.4
Strojírenství	10.3
Elektrotechnický průmysl	7.2
Potravinářský průmysl	4.3
Ostatní	0.7
CELKEM	100

1.2 Přehled slévárenských hliníkových slitin

1.2.1 Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706

Tato norma platí pro odlitky a stanovuje značení písmeny EN AC a pěti číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením, např. EN AC-21000 [AlCu4MgTi]. [1]

Jednotlivé části označení jsou v pořadí:

- předpona EN následována mezerou
- písmeno A určuje hliník

- písmeno C určuje odlitky
- spojovací čárka
- čtyři číslice označují chemické složení

První z pěti číslic v pětimístném číselném označení udává skupinu slitin hlavních slitinových prvků [1]:

řada 10000 – Al více než 99.00%

řada 30000 – slitina AlMn

řada 50000 – slitina AlMg

řada 70000 – slitina AlZn

řada 20000 – slitina AlCu

řada 40000 – slitina AlSi

řada 60000 – slitina AlMgSi

řada 80000 – slitina Al s různými prvky

tab. 2 Slitiny hliníku na odlitky [1]

Označení slitin podle ČSN EN 1706		Označení slitin podle ČSN		Označení slitin podle DIN 1725-2	
číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení	číselné značení	chemické značení
EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	-	-	3.1371	AlCu4MgTi
EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	-	-	3.1841	AlCu4Ti
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0.3	-	-	3.2371	AlSi7Mg0.3
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2381	AlSi10Mg(a)
EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	-	-	3.2383	AlSi10Mg(Cu)
EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	ČSN 42 4331	AlSi10MgMn	3.2373	AlSi9Mg
EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)	-	-	3.2382	AlSi10Mg(Fe)
EN AC-44000	EN AC-Al Si11	-	-	3.2211	AlSi11
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2373	AlSi12
EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2582	AlSi12(Fe)
EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu	-	-	3.2151	AlSi6Cu
EN AC-46000	EN AC-Al Si9Cu3(a)	ČSN 42 4339	AlSi8Cu2Mn	3.2163	AlSi9Cu3(a)
EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	-	-	3.2163	AlSi9Cu3
EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	ČSN 42 4330	AlSi12Mn	3.2583	AlSi12(Cu)
EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu(Fe)	-	-	3.2982	AlSi12Cu(Fe)
EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg	-	-	-	AlSi12CuNiMg
EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(a)	-	-	3.3541	AlMg3
EN AC-51200	EN AC-Al Mg9	ČSN 42 4519	AlMg10SiCa	3.3292	AlMg9
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	-	-	3.3561	AlMg5Si
EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	ČSN 42 4515	AlMg5Si1Mn	3.3261	AlMg5Si

Ve světě jsou hlavními představiteli, co se týče množství slévárenských výrobků, odlitky vyhotovené tlakovým litím. Aplikované slitiny pro odlévání pod tlakem jsou uspořádány a řazeny do pěti skupin s obecně charakteristickými vlastnostmi pro účely odlitku, jelikož je práce zaměřena na tlakové lití slitiny AlSi9Cu3 , tak jsou zde uvedeny pouze slitiny typu Al-Si-Cu . [1]

1.2.2 Slitiny typu Al-Si-Cu

Tato skupina slitin patří mezi nejpoužívanější slitiny hliníku. Tvoří asi polovinu celkové produkce hliníkových odlitků. Z hlediska použití odlitků v automobilovém průmyslu jsou tyto slitiny velmi významné. Nejčastěji se jedná o podeutektické slitiny s obsahem 6-13%Si a 1-5%Cu. Měď dodává těmto slitinám dobré mechanické vlastnosti a také dobrou obrobitelnost. Naproti tomu ale snižuje odolnost vůči korozi, která ovšem v automobilovém průmyslu postačuje. Slitiny tohoto typu mají poměrně malý sklon ke vzniku trhlin a staženin. Pro danou slitinu je proto vhodné udržovat obsah křemíku v horním pásmu tolerance. Slitiny s vyšším obsahem křemíku mají lepší zabíhavost. [2]

Odlitky ze slitin Al-Si-Cu se dále tepelně nezpracovávají. Přítomnost mědi popř. zinku může vést k samovolnému vytvrzení odlitků. Efekt samovolného vytvrzení se zvyšuje s rostoucí rychlostí ochlazování při tuhnutí a tím vzniká přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. [2]

1.2.3 Slitina AlSi9Cu3(Fe)

Charakteristika: Jedna z nejčastěji používaných slitin, vhodná pro univerzální účely, zejména však pro tlakové lití. Má střední hodnoty mechanických vlastností, dobrou pevnost za vyšších teplot. Je dobře obrobitelná. Odolnost proti korozi je střední.

Odlévání: Slitina má dobrou zabíhavost, má malý sklon ke vzniku soustředěných staženin. Doporučuje se provádět očkování a při lití do pískových forem rovněž modifikaci. Slévárenské vlastnosti se zlepšují s rostoucím obsahem křemíku.

Tepelné zpracování: Obvykle se používá v litém stavu. U odlitků, litých do kovových forem dochází k samovolnému vytvrzování za studena. Tento trend se zvětšuje s rostoucím obsahem Mg.

Použití: Typická slitina pro odlitky automobilového průmyslu, jako jsou skříně, bloky, víka, hlavy válců atd. Rovněž pro elektrotechnický průmysl, díly elektromotorů, díly pro domácí spotřebiče. Je vhodná i pro výrobu tenkostěnných, tvarově komplikovaných odlitků [1]. Chemické složení slitiny je uvedeno v tab. 3, termofyzikální vlastnosti pak uvádí tab. 5.

tab. 3 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3(Fe) dle normy DIN EN 1706

Chemické složení v hmotnostních %											
Al	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Sn	Cr	Ti	Pb
zbytek	8,5 - 10,0	2,0 - 3,5	0,1 - 0,5	0,1 - 0,4	max. 1	max. 1,2	max. 0,3	max. 0,1	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,2

V amerických normách (Aluminium Association) je typickým představitelem slitina **AA 380.0** – odpovídá přibližně ČSN 42 4339 - slitina AlSi9Cu3 (7.5 – 9.5 % Si, 2.0 – 3.0 % Cu).[1]

tab. 4 Mechanické vlastnosti vybraných slitin pro tlakové lití dle ASTM [1]

Slitina dle ASM	Odpovídá slitině dle ČSN	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]
AA 380.0	42 4339	320	160	2.5
AA 360.0	42 4331	300	170	2.5
AA 390.0	42 4386	280	240	1.0
AA 443.0	EN AC – AlSi5Cu1Mg	230	100	9.0
AA 518.0	EN AC – AlMg5	310	190	5.0

tab. 5 Fyzikální vlastnosti vybraných slitin pro tlakové lití dle ASTM [1]

Slitina dle ASM	Hustota [kg.m ³]	Interval tavení [°C]	El. vodivost IACS [%]	Tepelná vodivost při 25 °C [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Koef. tep. roztažnosti [K x 10 ⁻⁶] při °C	
					20 - 100	20 - 300
AA 380.0	2740	520 - 590	27	0.26	21.2	22.5
AA 360.0	2685	570 - 590	37	0.35	20.9	22.9
AA 390.0	2740	510 - 650	25	0.32	18.5	-
AA 443.0	2685	575 - 630	37	0.34	-	-
AA 518.0	2519	540 - 620	24	0.24	24.1	26.1

tab.6 Hodnocení vybraných slévárenských slitin pro tlakové odlévání dle ASTM[1]

Slitina dle ASM	Zabíhavost	Náchylnost ke vzniku trhlin za tepla	Korozní odolnost	Mechanická obrobiteľnosť	Možnosť eloxování a povrchový vzhľad
AA 380.0	2	2	4	3	3
AA 360.0	2	1	2	3	3
AA 390.0	2	4	3	5	5
AA 443.0	1	3	2	5	2
AA 518.0	5	5	1	1	1

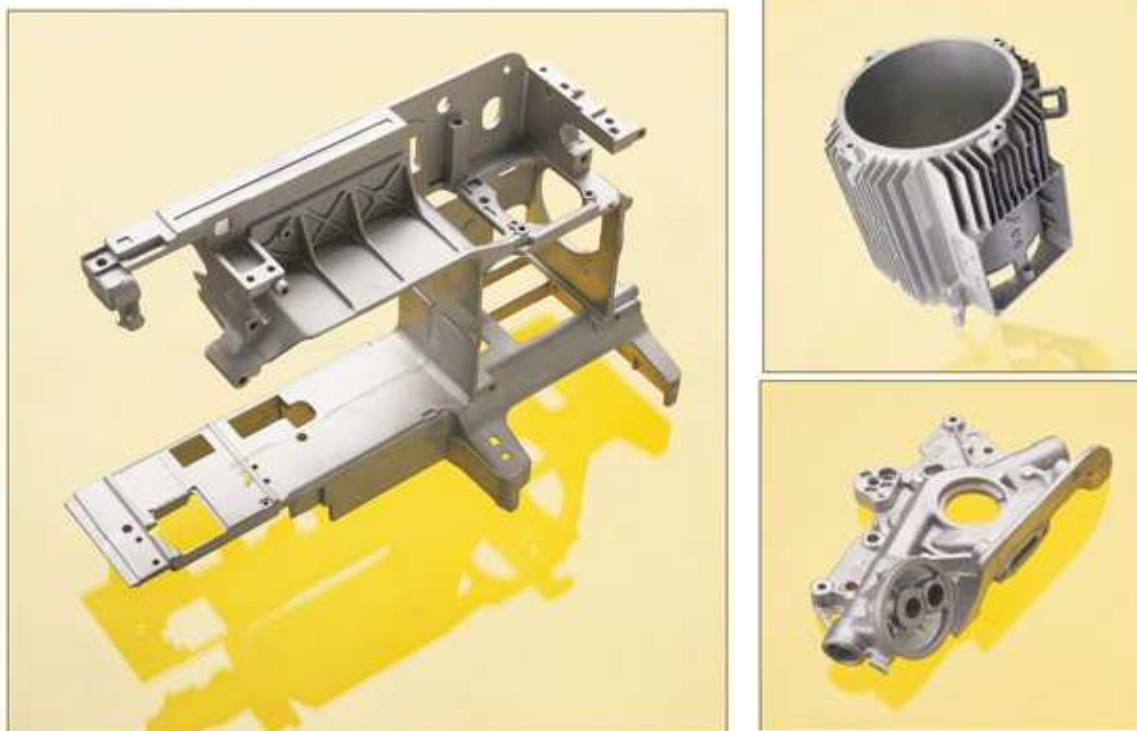
Poznámka k hodnocení: 1 – nejlepší, 5 – nejhorší

1.3 Lití pod tlakem

Jelikož je blok motoru škody fabie odléván metodou tlakového lití, tak je vhodné se o tomto způsobu výroby odlitků zmínit. Jedná se o jednu z nejdůležitějších metod výroby hliníkových odlitků. Principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem a to až 250 MPa. Vlivem takto vysokého tlaku je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky s tloušťkou stěn od 1-2 mm. U některých slitin a při dodržení určitých podmínek je možné vyrábět odlitky s tloušťkou stěny dokonce menší než 1 mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné. Ve formách lze používat výhradně kovová jádra. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader. Většina otvorů je předlévaná. Do forem je možné před litím vkládat kovové zálitky. [2]

Charakteristickými vlastnostmi tlakově litých odlitků jsou jemnozrnná krystalická struktura. Ta úzce souvisí s rychlostí krystalizace, resp. tuhnutím odlitku. K tuhnutí odlitku přispívají dva důležité faktory : vysoká schopnost kovové formy akumulovat teplo a vysoký tlak působící na taveninu, který způsobuje její tzv. atermické podchlazení. Značné uplatnění mají především slitiny s nižší tavicí teplotou, ale lze odlévat i slitiny s maximální tavicí teplotou cca do 1000 °C. Současně je snaha překonávat nebo omezovat jeden z velkých nedostatků tlakově litých odlitků a tím je porezita, která se může objevit až po obrábění a bývá příčinou netěsnosti odlitků. Nejvíce tlakových odlitků putuje do automobilového a leteckého průmyslu a je možné se s těmito odlitky také setkat např. v šicích strojích, domácích spotřebičích aj. Některé příklady tlakově litých odlitků jsou vidět na *obr. 1*. Jejich uplatnění je široké od automobilů až po hračky. Výsledkem tohoto způsobu lití je rovnoměrná součást, obvykle dobré rozměrové a povrchové přesnosti. [3,4]

obr. 1 Ukázky odlitků vyráběných metodou tlakového lití [5]

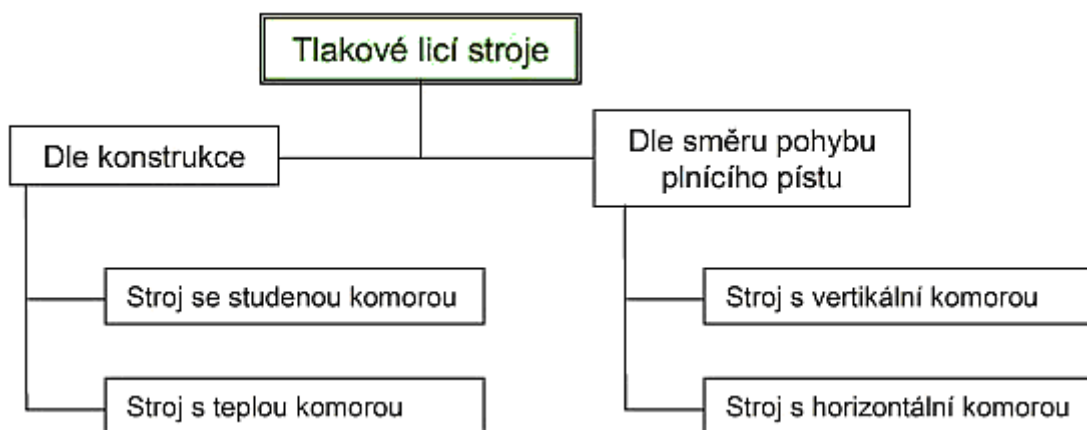




1.4 Tlakové lící stroje

Tlakové lící stroje se dělí dle dvou kritérií. A to buď dle konstrukce, nebo podle směru pohybu plnicího pístu.[1] viz. *obr. 2*

obr. 2 Rozdělení tlakových lících zařízení [6]



Stroje, tak jak je vidíme v dnešní podobě jsou výsledkem dlouholetého vývoje. Ovšem k vysoké kvalitě a konstrukci napomohlo využití řídicích a elektronických prvků a také výpočetní techniky. Zejména konstrukce a technické provedení těchto strojů doznaly velkých změn. [3]

Původní stroj s teplou tlakovou komorou, který je ukázán na *obr. 3* je dnes více vytlačován strojem se studenou tlakovou komorou viz. *obr. 4*. Dalším pokrokem byla konstrukce tlakových strojů s horizontální tlakovou komorou. Stroje této konstrukce si našly velké uplatnění, protože dosahují vyššího pracovního výkonu, lepšího využití odlévaného kovu a současně se vyznačují jednodušším vstřikovacím systémem a jsou také spolehlivější. Rychlost plnění je

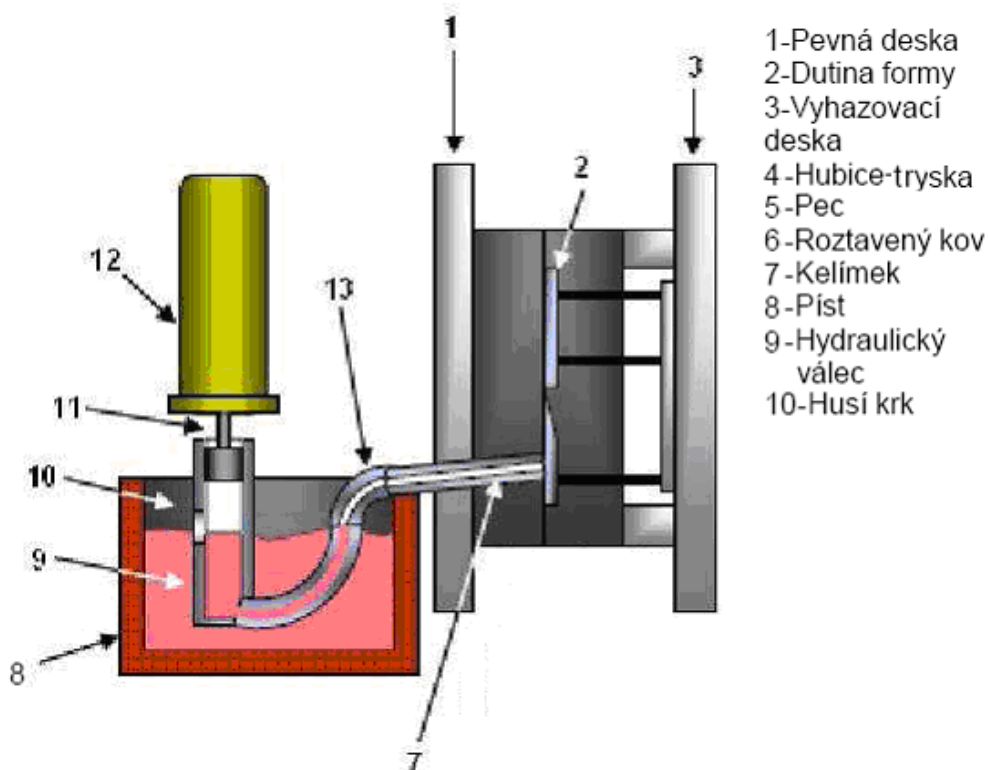
cca $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v okamžiku, kdy tavenina pronikne do zářezů se rychlost zvýší na $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Forma je dělená a předehřívá se na teplotu cca $200\div 240^\circ\text{C}$. [3,7]

Stroje s vertikální komorou mají v komoře naproti sobě dva písty, z nichž horní píst je pracovní a spodní je pomocný. Horním pístem se vtlačuje tavenina do dutiny formy a spodním se vytlačuje přebytek taveniny. Píst postupně vtlačuje taveninu do dutiny formy, která se otevře až po ztuhnutí. Pohyblivá část formy dojde na doraz a vyjedou z ní vyhazovače. Tyto musí být rozloženy tak, aby se odlitek nedeformoval. Forma bývá temperovaná. [7]

1.4.1 Stroje pro tlakové lití s teplou komorou

Tyto stroje mají plnicí komoru ponořenou pod hladinou roztaveného kovu v udržovací peci viz. obr. 3. Jejich výhodou je, že se kov s udržovací komory do dutiny formy nepřelévá, a tak nedochází k jeho oxidaci. Do dutiny formy se roztavená slitina vstříkuje buď pístem nebo stlačeným vzduchem. Tlaková komora může být vytvořena přímo z kelímku nebo je do kelímku ponořena. Komora se v hrdle zužuje a končí tryskou. Při vstřikování pístem se píst nejprve zvedne a tím se uvolní plnicí otvory, kterými nateče do komory roztavená slitina. Pak se píst posouvá směrem dolů, čímž se plnicí otvory uzavřou a slitina proudí hubicí a tryskou do formy. Slitina zůstane pod tlakem tak dlouho, až odlitek ztuhne a po uvolnění tlaku vteče zpět do komory. Při vstřikování stlačeným vzduchem se nejprve tlaková komora naplní plnicím otvorem, který se uvolní zvednutím táhla zakončeného kužele. Pak táhlo uzavře plnicí otvor a do komory se vpustí stlačený vzduch, který žene slitinu do formy. Tento typ licích strojů se pro odlévání hliníku příliš nepoužívá, je však častý při lití slitin hořčíku a zinku [2,9]

obr. 3 Stroj pro tlakové lití s teplou komorou [8]



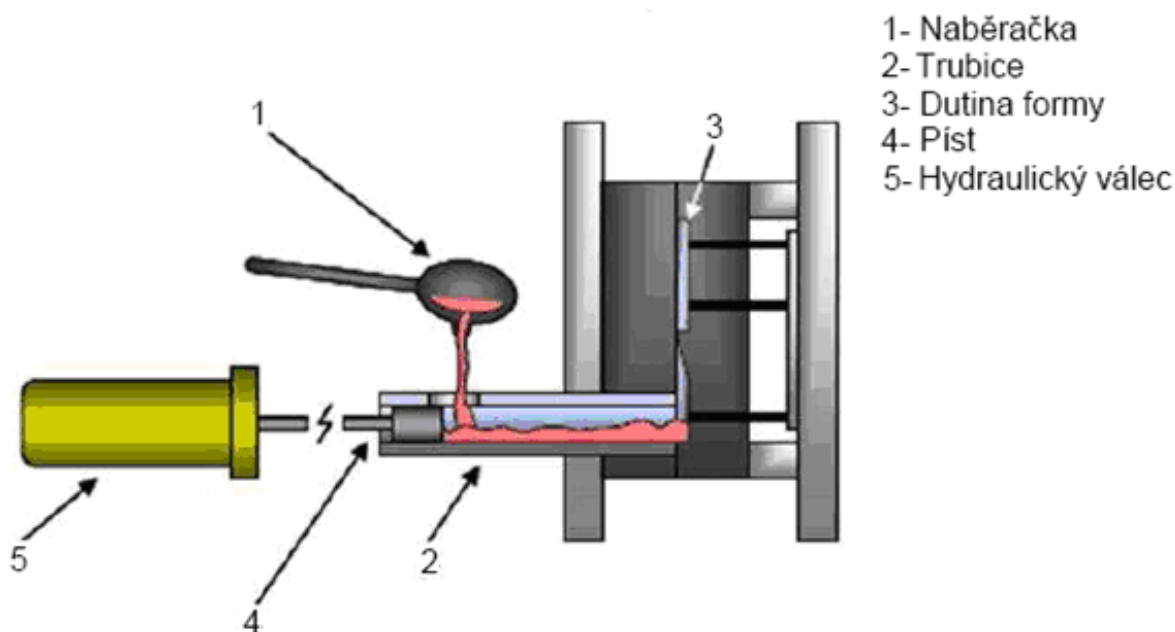
1.4.2 Stroje pro tlakové lití se studenou komorou

Tyto stroje nalezají od strojů s teplou tlakovou komorou mají komoru zcela oddělenou od udržovací pece viz. obr. 4 a pro vstříknutí kovu se používá výhradně píst. Krátce před vstříknutím kovu se plnicí komora naplní buď naběračkou nebo dávkovacím strojem roztaveným kovem, přičemž množství nalitého kovu musí odpovídat velikosti odlitku a velikosti komory.

U strojů s vertikální komorou je vstřikovací otvor zaslepen odpruženým protiběžným pístem, který tvoří dno tlakové komory. Do plnicího válce komory se nalije roztavený kov a spustí se tlakový píst. Teprve tehdy, až tlak kovu přemůže odpor pružiny, se otevře vstřikovací otvor a slitina je vstřikována do formy. Po dokončení vstřiku se uvolní tlak, protiběžný píst vyjede nahoru, odstřihne vtok od odlitku a vyhodí ztuhlý zbytek z komory. U slitin se často vytváří komora přímo ve formě. [9]

Ve strojích s horizontální komorou je vodorovný plnicí válec s otvorem, do kterého se nalévá roztavená slitina. Na plnicí válec navazuje komora ve formě, ve které je slitina stlačena pístem a vstříknuta do dutiny formy. Aby nedošlo k předčasnému zalití dutiny formy, umísťuje se forma většinou nad komorou. Po ztuhnutí odlitku se forma rozevře, píst vysune zbytek kovu z komory a vrátí se do zadní polohy. [9]

obr. 4 Stroj pro tlakové lití se studenou komorou [8]



1.5 Fáze plnění dutiny formy při tlakovém lití

Kvalita tlakově litych odlitků se určitým způsobem odvíjí od tlakového stroje a od jeho nastavení. Toto je jednou z klíčových součástí výroby „bezvadných“ odlitků. Proto je třeba odladit na stroji zejména plnění dutiny formy roztaveným kovem. Plnění je možné rozdělit do několika fází:

1. fáze: naplnění plnicí komory tlakového lícího stroje potřebným množstvím tekutého kovu, pomalý posuv pístu, uzavření plnicího otvoru komory – působení tlaku na kov se neděje resp. tlak na kov je zanedbatelný (překonává jen odpor v lící komoře).

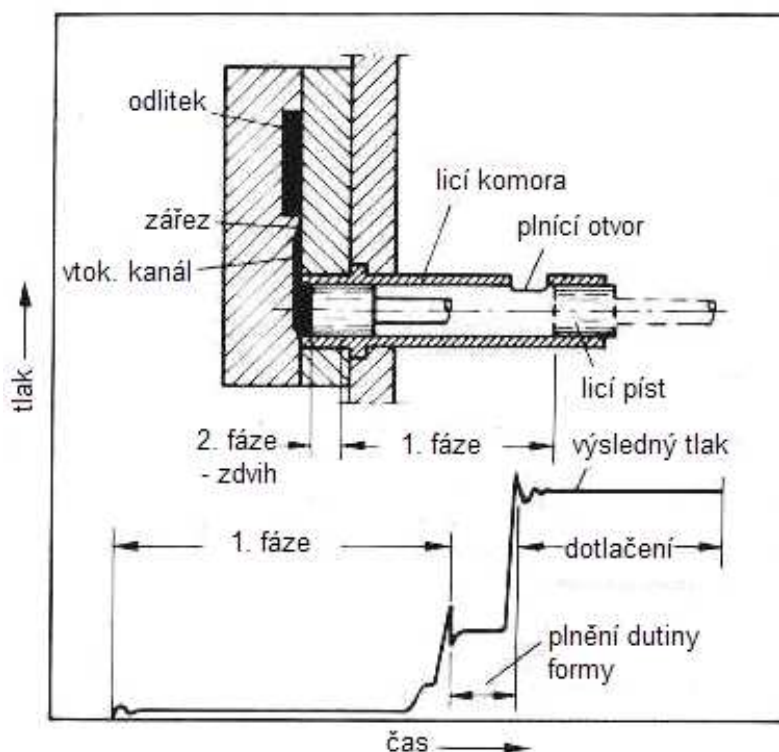
2. fáze: tavenina se pohybem pístu dostává k zářezům tlakové formy. Vtokovou soustavou prochází množství kovu vysokou rychlostí, nastává velké tření a část pohybové energie proudu kovu se proto mění na teplo tj. teplota kovu roste. Rychlost pístu se zvyšuje na maximální hodnotu.

3. fáze: dochází k plnění dutiny formy tekutým kovem. Vlivem metalodynamického tlaku proudícího kovu je forma doplňována a hodnota tlaku rychle vzrůstá až dosáhne maxima, jak lze pozorovat na obr. 5.

4. fáze: po úplném vyplnění dutiny formy kovem přestane působit dynamický účinek kovu a po dobu tuhnutí na kov působí pouze metalostatický tlak. Začíná fáze dodatečného lisování.

Režim plnění dutiny formy závisí na vstupní rychlosti taveniny, viskozitě, povrchovém napětí slitiny, poměru hloubky zářezu a hloubky stěny odlitku, tepelném poli ve formě. Plnění dutiny je nejčastější příčinou možného vzniku exogenních bublin, které jsou typickými vadami tlakově litych odlitků. [10]

obr. 5 Průběh tlaku v pracovním válci u stroje se studenou komorou [11]

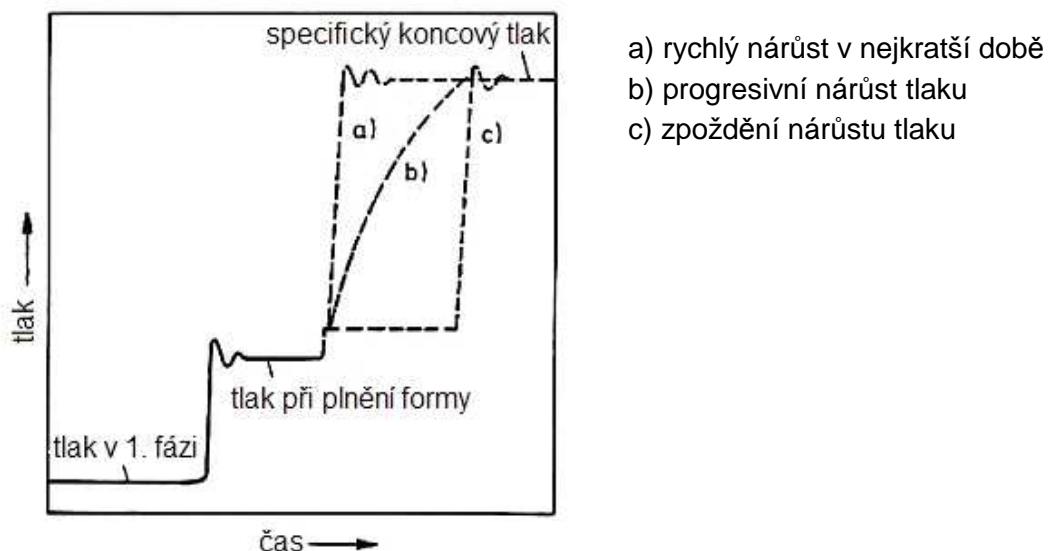


1.6 Čtvrtá fáze plnění dutiny

Čtvrtá fáze spočívá ve zvýšení konečného tlaku vyvolaného na kov v tekutém stavu bezprostředně po zaplnění formy. Zařízení, kterým se zvýšení tlaku provádí se nazývá **multiplikátor** (násobič tlaku) a tento působí na píst licí jednotky. U slabostěnných odlitků je nutné, aby bylo připojení multiplikátoru velice rychlé, a to proto, že působící síla musí být při dotlaku na tuhnoucí materiál ještě účinná. Moderní multiplikátory se dokáží aktivovat během několika milisekund a umožňují tak okamžité působení dotlaku. [11]

Čas potřebný k nárůstu tlaku je u většiny multiplikátorových systémů seřiditelný, ačkoliv v normálních případech se upřednostňuje okamžité připojení tzn. použití multiplikátoru s nejkratšími časy nárůstu tlaku. Pokud se však odlévají odlitky se silnějšími stěnami, může být naproti tomu účelné nechat působit multiplikátor buď s určitým zpožděním, a nebo s progresivním nárůstem tlaku viz. obr. 6. [11]

obr. 6 Možnosti nárůstu tlaku multiplikátoru [11]



1.7 Lití s krystalizací pod tlakem

Squeeze casting, jak je také někdy tento proces nazýván, je poměrně mladou technologií výroby odlitků. Jedná se o znovu objevenou metodu v oblasti technologie vysokotlakého lití, která využívá tzv. squeeze efektu. Tento efekt spočívá v dotlačení tekutého kovu při konečné fázi lití, ještě dříve než dojde ke ztuhnutí odlitku. Znamená to, že ke konci licího cyklu, v průběhu chladnutí, jsou buď v nástroji pro tlakové lití zabudovány pohyblivé části, které působí na určitá místa v chladnoucích partiích odlitku, nebo tlak působí na celý odlitek přes vtokovou soustavu. Nejčastěji se této metody používá pro „odlévání“ neželezných kovů, zejména pro hliník, hořčík, měď a jejich slitiny. V podstatě se jedná o kombinaci odlévání a kování (lisování), při kterém tuhne kov pod tlakem, v kovové formě a tato forma je umístěna do hydraulického lisu. Rychlost odvodu tepla roztaveného kovu do stěn formy a působící tlak jsou přitom důležitými faktory ovlivňující strukturu a mechanické vlastnosti. Právě vliv působení tlaku vede ke snížení popř. odstranění vad způsobených plynem v dutině formy či v kovu, dále

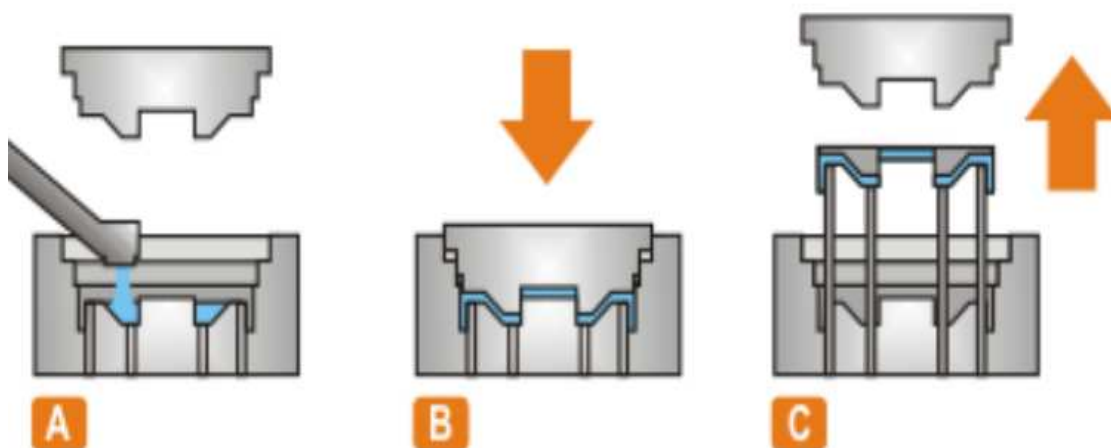
lze předejít vadám způsobených smršťováním. Působením vysokého tlaku při tuhnutí může být také zvýšena rychlost ochlazování. [12],[13],[14]

1.8 Rozdělení metod squeeze casting

1.8.1 Přímý squeeze casting

Zařízení na přímý způsob odlévání připomíná kovací zařízení viz. obr. 7. Tekutý roztavený kov se nalije do spodní části formy umístěné v hydraulickém lisu. Po nalití tekutého kovu dojde k postupnému uzavření horní části formy. Forma tlačí na tekutý kov velkým tlakem okolo 100 MPa a působí na celou část odlitku. [13]

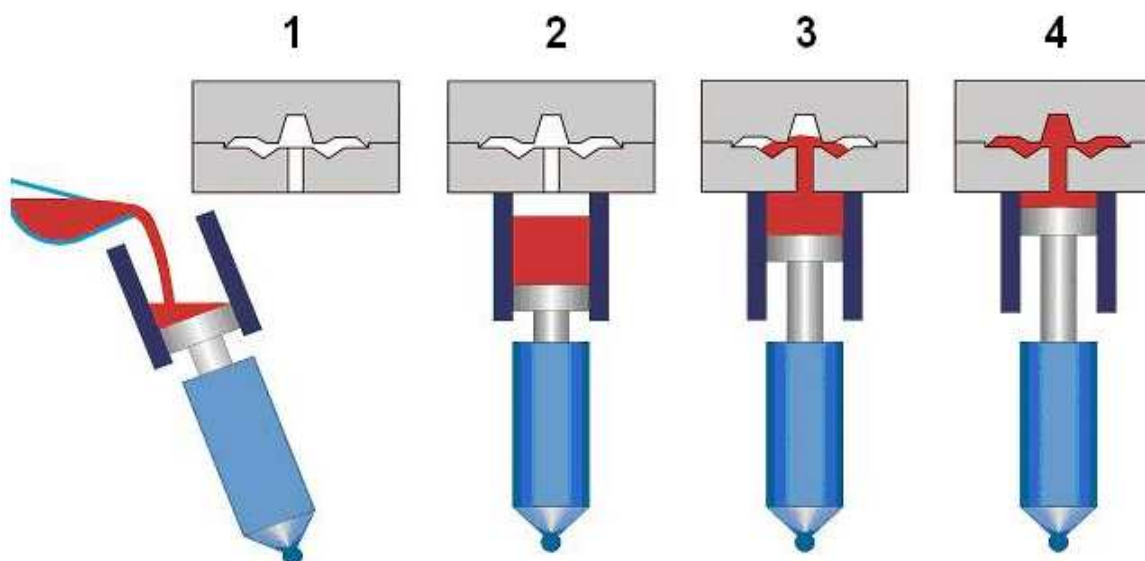
obr. 7 Přímý squeeze casting [15]



1.8.2 Nepřímý squeeze casting

Tento způsob se na rozdíl od předešlého podobá „klasickému“ lití. Odlévání se koná v licím stroji, ten může být buďto horizontální či vertikální. Princip nepřímého squeeze castingu je založen na vtlačení roztaveného kovu do dutiny formy speciálním pístem pomocí tzv. pomocného nálitku. obr. 8

Roztavený kov se nalije mimo pracovní prostor do válce sklopného pístu, poté dojde k naklonění válce do pracovního prostoru a následného pomalého vtlačení roztaveného kovu do prostoru dutiny formy. Odlitek za působení tlaku ztuhne a poté dojde k jeho vytažení z formy a celý proces se opakuje. [13]

obr. 8 Nepřímý squeeze casting [15]

1.8.3 Lokální squeeze casting

Tímto způsobem se zpevňují pouze určité partie odlitku, u nichž jsou vyžadovány vysoké mechanické vlastnosti např. místa pro uložení ložisek u klikových hřídelí, jako je to v případě odlitků této diplomové práce. Z hlediska mechanických vlastností se tato metoda řadí mezi velmi výhodné metody, avšak v dnešní době není příliš rozšířena. Vlivem působení velkých tlaků rostou i požadavky na konstrukci a materiál formy. Konstrukce formy je zásadní z hlediska rozmístění a uložení pohyblivých dílů, které způsobují lokální zpevnění určitých míst na daném odlitku. V těchto místech je ale zhoršený odvod tepla kvůli pohyblivým dílům, které znemožňují přívod chladicí kapaliny. [16]

1.9 Výhody a nevýhody squeeze castingu

Výhody:

- klidné plnění dutiny formy bez turbulencí
- zvýšení intenzity odvodu tepla z roztaveného kovu do formy
- vlivem tlaku nevzniká mezera na líci formy
- vysoká rychlost tuhnutí –vznik jemnozrnné struktury.
- dobré mechanické vlastnosti odlitku
- zvýšení přesnosti odlitku.
- omezení vzniku mikrostaženin.
- snížení obsahu plynových bublin
- působení tlaku zvyšuje slévateľnost slitin – možnost odlévat slitiny ke tváření
- vysoké využití tekutého kovu (80 - 90%) [15]

Nevýhody:

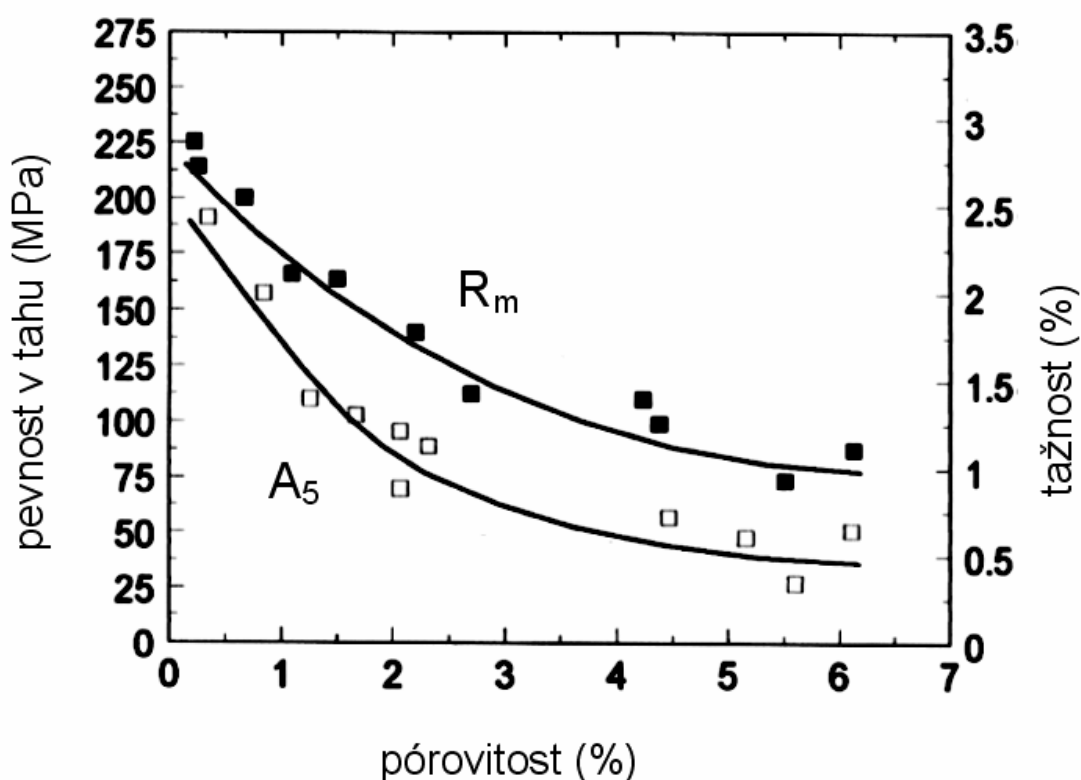
- rozměrově omezené možnosti výroby
- vysoké ekonomické náklady – nákladná kovová forma
- složitá výroba kovové formy
- malé zkušenosti s praktickým využitím metody
- nižší životnost forem a razníků [15]

1.10 Pórovitost v odlitcích

Pórovitost patří k nejčastějším vadám hliníkových odlitků. Od toho se také odvíjí fakt, že mnoho zásad tavení a metalurgických operací je zaměřeno na dosažení nízkého stupně naplynění taveniny. Porezita, jak je také nazývána, zhoršuje celou řadu užitných vlastností odlitku, zejména [2]:

- pevnostní vlastnosti – snižuje se pevnost i tažnost *obr. 9*
- únavové vlastnosti – póry jsou iniciačními místy pro vznik únavových lomů
- těsnost – pronikání tlakového média stěnou odlitku je častou příčinou zmetkování odlitků
- kvalitu obrobených ploch
- povrchovou úpravu odlitků

obr. 9 Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti slitiny AlSi6Cu4 [2]



1.11 Rozpustnost vodíku v hliníkových slitinách

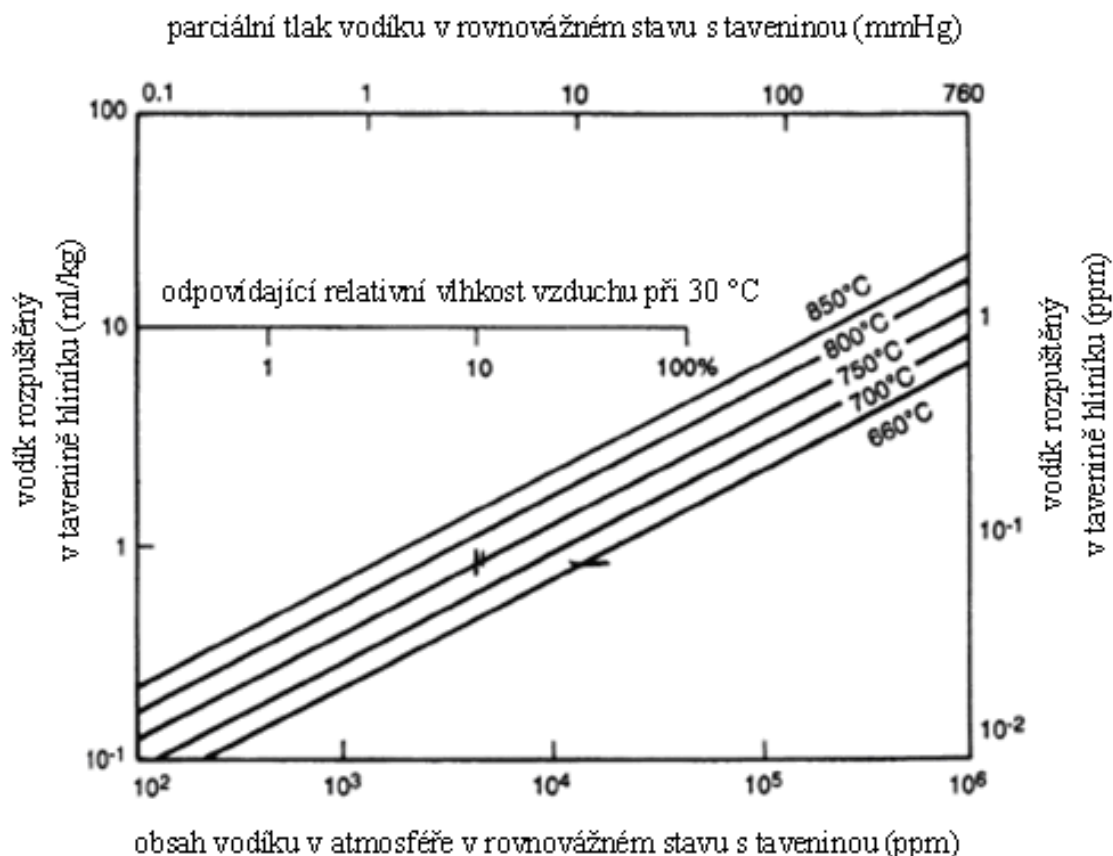
Rozpustnost plynu v kapalině omezuje množství plynu, které se rozpustí při tavení a zpracování. Množství vodíku rozpuštěného v hliníku za rovnovážného stavu závisí na relativní vlhkosti, parciálním tlaku vodíku a teplotě kovu, jak je znázorněno na *obr. 10*.

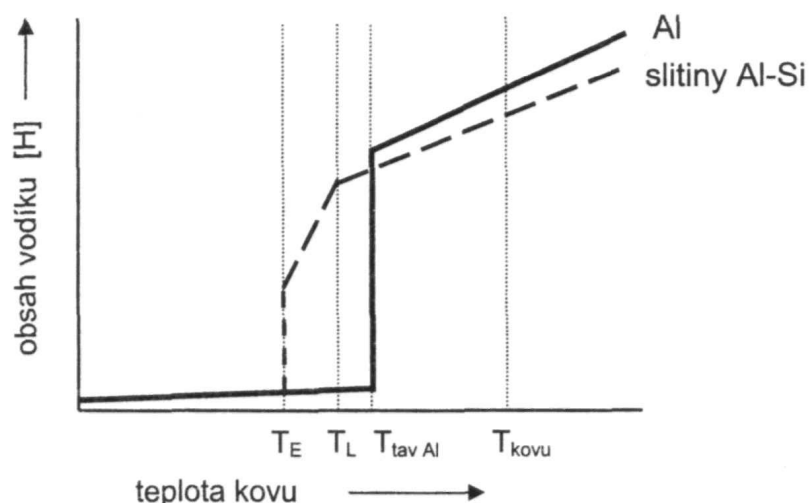
Rozpustnost plynu v průběhu tuhnutí kovu klesá, neboť se při tuhnutí zmenšuje prostor, který může rozpuštěný plyn zaplnit. Pokles rozpustnosti vodíku v hliníku při tuhnutí je uveden na *obr. 11*. Klesá z více než 6 ml/kg v tavenině pod 1 ml/kg v pevné látce. Rozpustnost vodíku je maximální množství vodíku, které se může za rovnovážných podmínek rozpustit v kovu určitého chemického složení, při určité teplotě a tlaku. Určuje se podle vztahu: [2],[17]

$$\log S = \frac{1}{2} \log p_{H_2} - \frac{A}{T} + B \quad (1)$$

kde: S – rozpustnost vodíku v tavenině [ml/kg]
 p_{H_2} – parciální tlak vodíku v okolní atmosféře [kPa]
 T – teplota kovu [°K]
 A,B – konstanty pro daný kov [2]

obr. 10 Obsah vodíku v tavenině hliníku při různých teplotách [17]



obr.11 Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a slitinech [2]

Ve srovnání s rozpuštěným vodíkem v rovnovážném stavu na *obr. 10* je relativní vlhkost 10 % postačující k nasycení hliníku vodíkem. Odpovídající vnitřní tlak plynu potřebný pro vznik bublin je možno odhadnout z *obr. 10*. Například hliníkový odlitek odlitý při teplotě 750 °C, relativní vlhkosti 10 % a parciálním tlaku vodíku 0,008 atm bude obsahovat okolo 0,9 ml/kg vodíku. Tlak při této koncentraci vodíku v průběhu chlazení roste na 0,013 atm. K potlačení vzniku bublin stačí něco málo přes 50 mm hliníku, nemluvě o dodatečném tlaku nutném ke vzniku zárodků. [17]

Při tavení hliníku dosahuje obsah vodíku obvykle 0,20 ml/100g. Dobré odplynovací postupy snižují tuto hodnotu na 0,06 až 0,10 ml/100g. Podle zkušeností s odléváním hliníku porezita nevzniká, je-li obsah vodíku nižší než 0,15 ml/100g. V tuhém stavu to odpovídá tlaku asi 0,08 atm. Tlak k vytvoření bubliny musí překročit nejen metalostatický tlak, ale i mez pro vznik zárodků [17], jež je dána vztahem [2]:

$$p_{H_2} > p_{atm.} + p_{met.} + p_{\sigma} \quad [MPa] \quad (2)$$

kde:

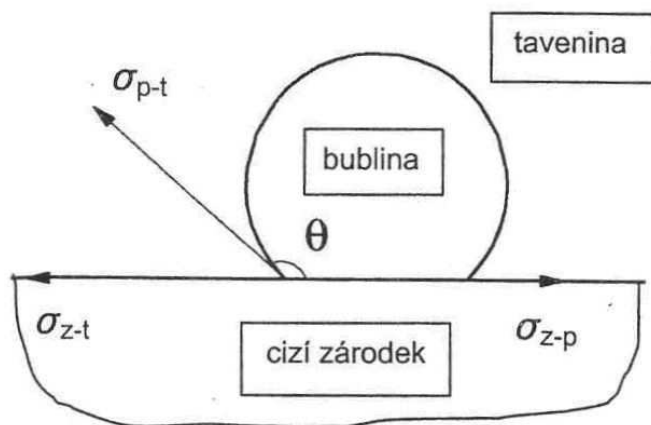
$$p_{\sigma} = 2 \cdot \sigma / r \quad [MPa] \quad (3)$$

kde: σ – povrchové napětí na rozhraní tavenina-bublina [Pa]
 r – poloměr bubliny [mm]

Zárodky na vrstvičce oxidů snižují potřebný tlak jak zvýšením původního poloměru r , tak změnou povrchového napětí. Pro heterogenní nukleaci je důležitý úhel smáčení a tvar povrchu viz. *obr. 12*. Bubliny způsobené vodíkem se v hliníkových odlitcích nemusí do 0,30 ml/100g vůbec vytvořit, nejsou-li v hliníku přítomny oxidy, které by podporovaly vznik zárodků. Tímto se tlak nutný ke vzniku pórů zvyšuje na 0,13 atm při tuhnutí. Pokud hliníková tavenina obsahuje

méně oxidů nebo vodíku, bubliny vznikají při tuhnutí až později. Studie různých tvarů pórů je naznačena v tabulce 7. [17]

obr. 12 Tvorba bublin na cizím zárodku [2]



Vzájemný poměr mezi napětími určuje kontaktní úhel Θ a tedy smáčivost cizího zárodku a bubliny (rov. 4). [2]

$$\cos \Theta = [(\sigma_{z-t} - \sigma_{z-p})] / \sigma_{p-t} \quad [1] \quad (4)$$

kde: σ_{z-t} – povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou [Pa]

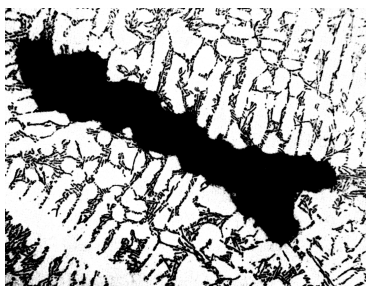
σ_{z-p} – povrchové napětí mezi zárodkem a plynem [Pa]

σ_{p-t} – povrchové napětí mezi plynem a taveninou [Pa]

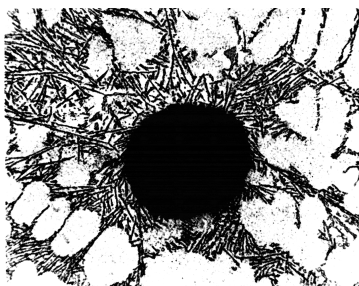
V intervalu tuhnutí se využívá nejen nukleačního potenciálu cizích zárodků, ale i krystalů vlastní tuhé fáze. V některých případech není vůbec nutné, aby docházelo k nukleaci nových bublin, neboť se využijí již existující iniciační bubliny, např. ve vměstcích. [2]

Kromě koncentračních poměrů a vlivu cizích zárodků se při nukleaci plynových bublin významně uplatňují i lokální tlakové poměry v oblasti jejich vzniku. Např. při krystalizaci může tuhá fáze uzavřít určité mikroobjemy taveniny, do nichž se nemůže dosazovat tekutý kov. V těchto místech vzniká podtlak (podle Sievertsova zákona se místně sníží rozpustnost vodíku) a zlepšují se tak podmínky pro tvorbu plynových dutin. Mikrostaženiny jsou vždy vhodným místem pro vznik plynových bublin. [2]

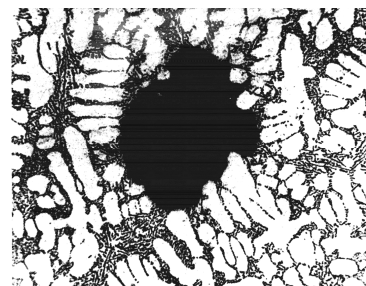
obr. 13 Tvar pórů ve slitinách Al [2]



mikrostaženina











plynová bublina



porezita
(plyn a mikrostaženina)

tab. 7 Druhy pórů v hliníkových odlitcích [17]

Póry	kulaté póry	dlouhé, široké	dlouhé, popraskané	malé, popraskané
Tuhnutí a vznik bublin				
Tuhnutí a vznik bublin				
Vlastnosti	- srážení v tavenině za tekutého stavu nebo na začátku tuhnutí	- vznik za stále velkého podílu kapalné složky	- vznik při tvoření dendritické sítě	- srážení těsně před koncem tuhnutí
	- růst bublin neomezen	- uspořádání rostoucích bublin a dendritů	- růst bublin omezen stále volnými kanálky taveniny	- tvar a velikost pórů závislá na uzavřeném prostoru mezi dendrity
	- nutný vysoký obsah vodíku	- vysoký až střední obsah vodíku	- střední až nízký obsah vodíku	- nízký obsah vodíku

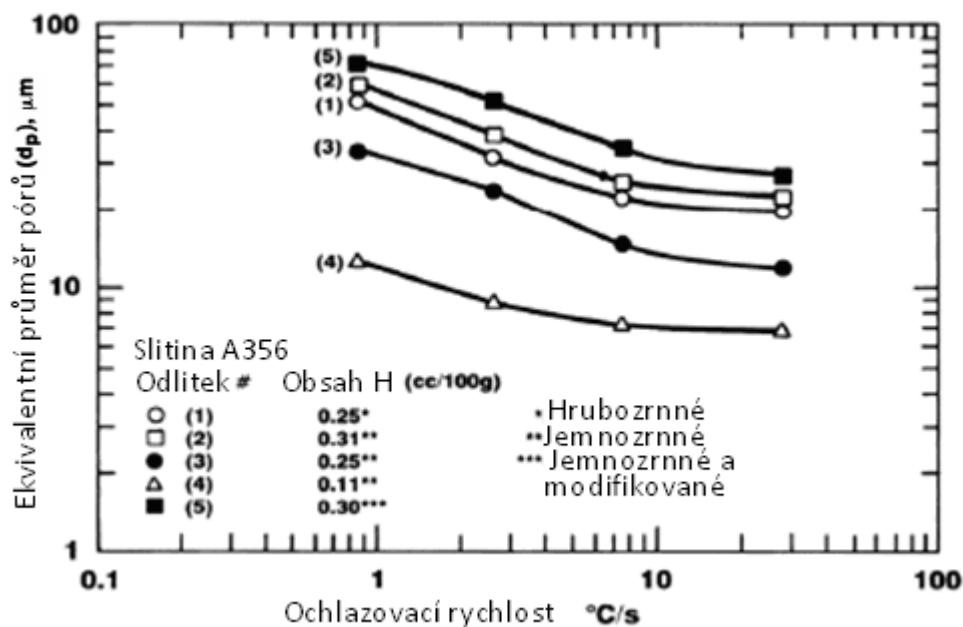
Je-li hlavní překážkou pro vznik bublin povrchové napětí, obzvláště v pozdějších fázích tuhnutí, dá se spočítat velikost zárodků tvořených oxidy. Při tlaku 0,08 atm, který odpovídá obsahu vodíku 1,5 ml/kg, bude velikost zárodků 0,022 cm. V čistém hliníku při tlaku 0,13 atm bude pak velikost zárodků 0,013 cm. To jsou docela přiměřené velikosti zárodků bublin v hliníkových odlitcích. [17]

Průměrné složení plynu po první minutě vývinu může napovědět, jak bude dezoxidovat forma či jádro a jak budou přispívat k tvorbě bodlin v hliníku. Pokud je vodík obsažen jen v malém množství, tak to naznačuje, že vodíkové bubliny v hliníkových odlitcích jsou způsobeny spíše přítomností vlhkosti při tavení. Je-li přítomna vlhkost, zcela jistě může zapříčinit místní tvorbu bodlin. [17]

Jak bylo řečeno výše, v hliníkových slitinách je porezita důsledkem přítomnosti vodíku a závisí na jeho množství rozpuštěného v tavenině, výskytu zárodečných míst či oxidů a podmínkách tuhnutí. Úprava siluminů stronciem může změnit průběh tuhnutí, které pak vede k více mikropórům a snižuje se obsah makropórů. Někde se tak zkoušelo omezit škodlivé účinky vodíku na tyto slitiny. Velikost plynových bublin je ovlivněna rychlostí chladnutí, obsahem plynu a druhem tuhnutí, jak je znázorněno na obr. 14. [17]

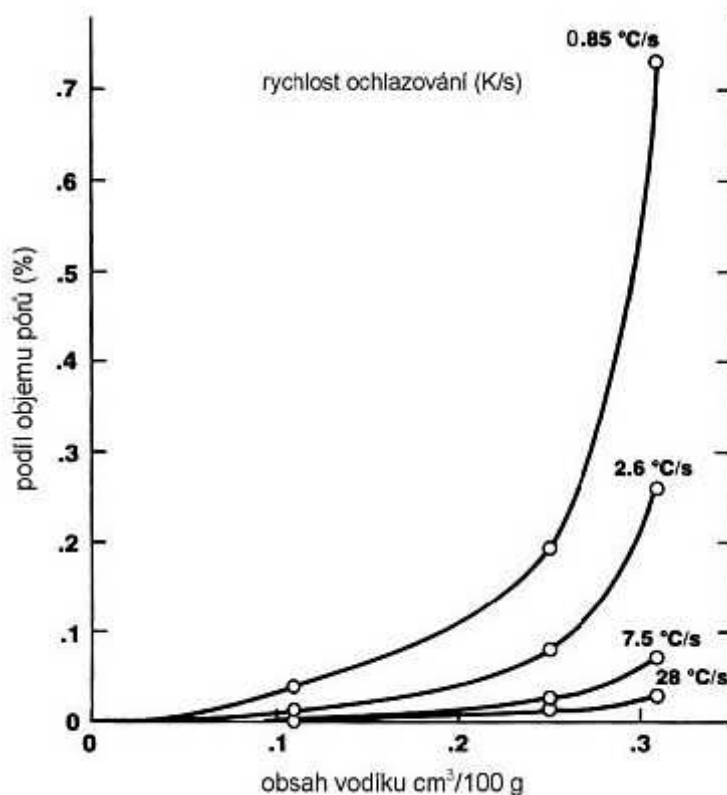
Porezita bývá způsobena kombinací tvorby mikrostaženin a bublin. Plynové bubliny nebo čistě mikrostaženiny vznikají jen zřídka. V případě, kdy převažuje mechanismus vzniku bublin, mají póry více kulovitý tvar, pokud převažuje mechanismus mikrostaženin, jsou dutiny tvarově členité a kopírují dendritickou stavbu kovu – obr. 13. Póry se obvykle vyskytují v mezidendritických prostorech, které jsou posledním místem odlitku, kde dochází k tuhnutí. Porezita je problémem zejména slitin se širokým intervalem tuhnutí. [2]

obr. 14 Střední průměr pórů v závislosti na rychlosti chlazení v litém hliníku A356. [17]



Vliv na množství a rozmístění pórů má rovněž očkování a modifikace taveniny. Soustředné větší dutiny se vyskytují u nemodifikovaných, neočkovaných tavenin. Naopak modifikované a očkované taveniny mají snahu tvořit rozptýlené mikrostaženiny [1,11].

obr. 15 Vliv obsahu vodíku a rychlosti ochlazování na objem pórů [2]



1.12 Pórovitost a kvalita

Konstruktéři si nejsou zcela jisti, jak zahrnout pórovitost do návrhu. Mohou předepsat rozsáhlé zkoušky kvality, provést řadu pokusů a počítat s velkými bezpečnostními faktory. Žádné z těchto opatření nezaručí jistou kvalitu a navíc všechna tato opatření jsou docela drahá. [17]

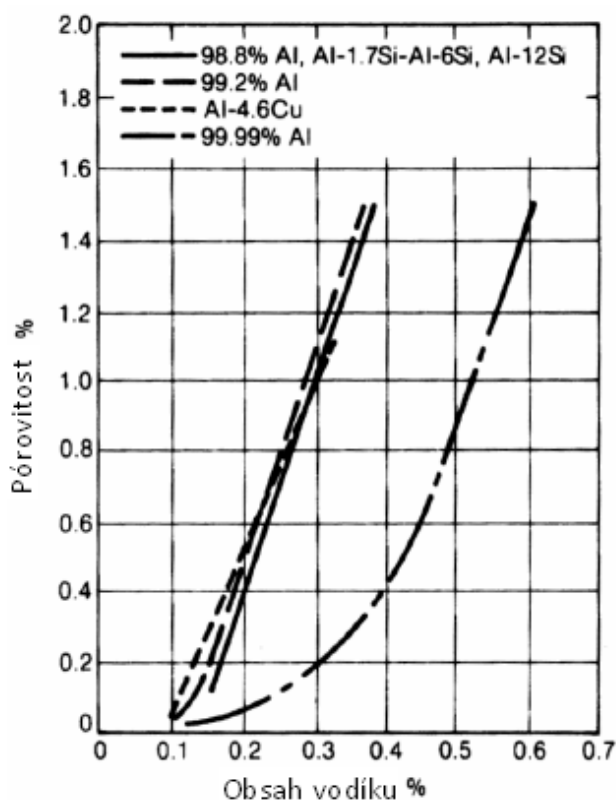
Běžně se provádí detekce pórovitosti nedestruktivními metodami. Bohužel, v kritických částech může i pórovitost pod rozlišovací úrovní vážně ohrozit kvalitu. I když je detekovatelná, dostupné standardy pro popis pórovitosti jsou kvalitativní. Většinou se jedná o subjektivní pracovní standardy, které nezajistí kvalitu. Výzkum radiografie již dříve hodnotil 128 filmů v pěti úrovních RTG záření a interval 95 % spolehlivosti byl 1,42 úrovně. Systematická pórovitost, jako jsou řediny, se kontroluje lépe než chaotická pórovitost, jako bodliny. [17]

Na základě zkoušek kvality je možno stanovit omezení na nejvíce vyráběné produkty a najít vztah mezi pórovitostí a kvalitou. Konstruktor tak může předepsat povolené meze a kontrolu. Toto řešení je nákladné a přitom nemusí zabránit poruše, pokud zkouška nenapodobuje dostatečně věrně provozní podmínky.

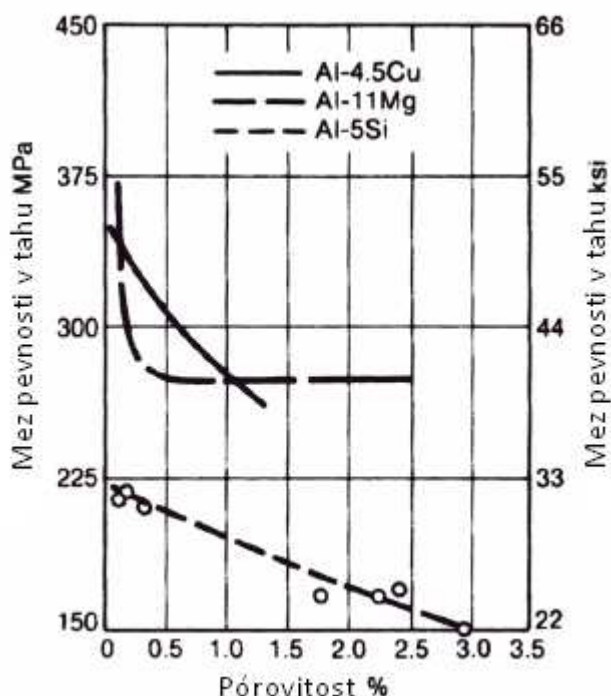
Velké bezpečnostní faktory omezují efektivnost návrhu. Silnější průřezy, vyšší hmotnost a změna tvaru mohou vést k pórům, které se u menších částí nevyskytovaly. Tato cena za velikost a bezpečí nebývá tak často brána na vědomí. [17]

Póry a mikrořediny v hliníku omezují mechanické vlastnosti slitin viz. obr. 9. Závislost pórovitosti na obsahu vodíku je na obr. 16 a z ní vyplývající pokles pevnosti na obr. 17. Litý hliník má malou tažnost a proto i nízká pórovitost může mít velký vliv na pevnost. [17]

obr. 16 Závislost pórovitosti na obsahu vodíku v hliníkovém odlitku [17]



obr. 17 Mez pevnosti v tahu v závislosti na „vodíkové“ pórovitosti v hliníkovém odlitku [17]



1.13 Pórovitost z hlediska tvaru pórů

Rozhodujícím ukazatelem není jen procentuální objem bublin, ale i jejich geometrický tvar, a to z hlediska možnosti iniciace trhliny na okraji póru. Budou-li plyny vyloučeny v podobě kulových tvarů, je pravděpodobné, že budou mít méně negativní vliv na mechanické vlastnosti, než póry jehlicovitého, či plošného, deskového tvaru viz. obr. 18. K hodnocení dutin ve struktuře odlitku se velmi často zavádí tvarový faktor (shape factor):

$$f = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_p}{U^2} \leq 1 \quad [-] \quad (5)$$

K určení kvantitativních geometrických parametrů struktury se užívá také jeho reciproké hodnoty faktoru kulatosti:

$$s = \frac{U^2}{4 \cdot \pi \cdot A_p} \geq 1 \quad [-] \quad (6)$$

Po úpravě rovnic č. 4 a 5 lze dostat přímý vztah mezi tvarovým faktorem a faktorem kulatosti:

$$s = \frac{1}{f} \quad [-] \quad (7)$$

kde: A_p ...obsah plochy [m^2]

U ...obvod plochy dutiny lokalizované na metalografickém výbrusu [m]

Hodnota faktoru kulatosti je pro kulatý pór rovna jedné, s přibývajícím složitostí a členitostí se zvyšuje viz. obr. 18. Faktor citlivě respektuje měnící se geometrii vnitřních dutin, která má samozřejmě vliv na změnu mechanických vlastností. Póry s faktorem kulatosti $s > 1$ vykazují při stejné pórovitosti P vyšší míru přerušení kovové matrice než kulovité póry $s = 1$, což odpovídá pórovitosti vyšší o faktor s . Se vzrůstajícím faktorem s narůstá i vrubový účinek pórů, zvyšuje se tvorba trhlin ve struktuře a to se projeví na pevnosti materiálů. Pro stanovení mechanických vlastností R_m , $R_{p0,2}$ se užívají vztahy (8),(9). [18]

obr. 18 Tvary pórů s různým faktorem kulatosti „s“ [18]



$$R_m = R_m^0 \cdot (1 - s \cdot P) \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

$$R_{p0,2} = R_{p0,2}^0 \cdot (1 - P) \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

kde: R_m , $R_{p0,2}$ mez pevnosti, mez průtažnosti pórovitého materiálu
 R_m^0 mez pevnosti materiálu bez pórů

1.14 Krystalizace kovů při zvýšeném tlaku

Při tlakovém lití má na kritickou velikost krystalizačního zárodku vliv jak podchlazení taveniny způsobené vysokou akumulací schopností kovové formy, tak i atermické podchlazení, tj. podchlazení způsobené zvýšeným tlakem působícím na krystalizující taveninu.

Zvýšený tlak příznivě působí na vznik malého krystalizačního zárodku o kritické velikosti r_{KR} a tím i na vznik jemnozrnné krystalické struktury viz. obr. 18. Z obrázku je zřejmé, že čím větší tlak působí na krystalizující taveninu, tím menší je kritická hodnota velikosti zárodku. [19]

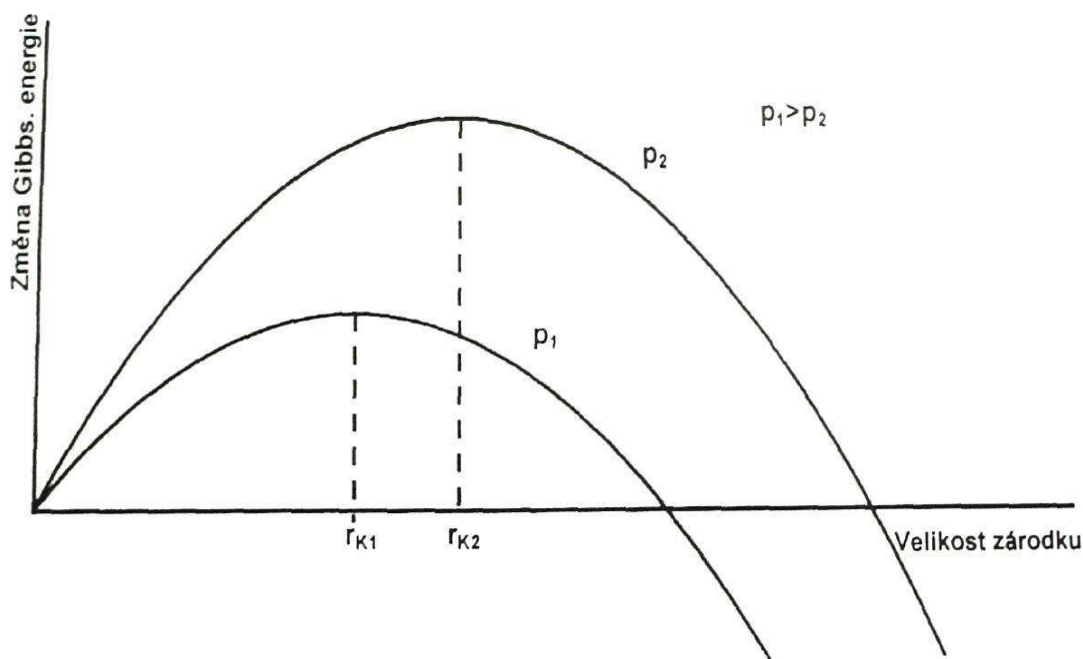
Vliv tlaku na teplotu krystalizace kovů a jejich slitin (na teplotu likvidu a solidu) vyjadřuje Clausius - Clampeyronova rovnice. [19]

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T \cdot (V_L - V_S)}{\Delta H_{L,S}^0} \quad (10)$$

kde: $\Delta H_{L,S}^0$ - změna entalpie při krystalizaci [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]
 $V_L - V_S$ - rozdíl molových objemů v kapalném a tuhém stavu [$\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$]
 T - teplota [K]
 dT/dp - diferenciální koeficient udávající změnu teploty krystalizace v závislosti na tlaku

Tato rovnice popisuje zvýšení teploty krystalizace odlévané slitiny účinkem tlaku jako důsledek zmenšení měrného objemu. Pro většinu kovů se s rostoucím tlakem působícím na taveninu zvyšuje teplota likvidu i solidu odlévaného materiálu ($V_L > V_S \Rightarrow dT/dp > 0$). [19]

obr. 19 Závislost kritické velikosti krystalizačního zárodku na tlaku [19]



Na obr. 19. je uvedeno schéma působení tlaku na krystalizující slitinu o teplotě likvidu (T_L) a solidu (T_S). V důsledku působení tlaku dochází k posuvu rovnovážných teplot likvidu T_L a solidu T_S do oblasti vyšších teplot ($T_L = f(p)$ a $T_S = f(p)$).

Na obrázku jsou 3 oddělené oblasti:

- oblast 1 - stabilního tekutého stavu
- oblast 2 - metastabilního tekutého stavu
- oblast 3 - metastabilního tuhého stavu

Za předpokladu, že tavenina má teplotu T , lze ze schématu vyčíst podmínky vzniku atermického podchlazení taveniny vlivem jejího teplotně-tlakového stavu. [20]

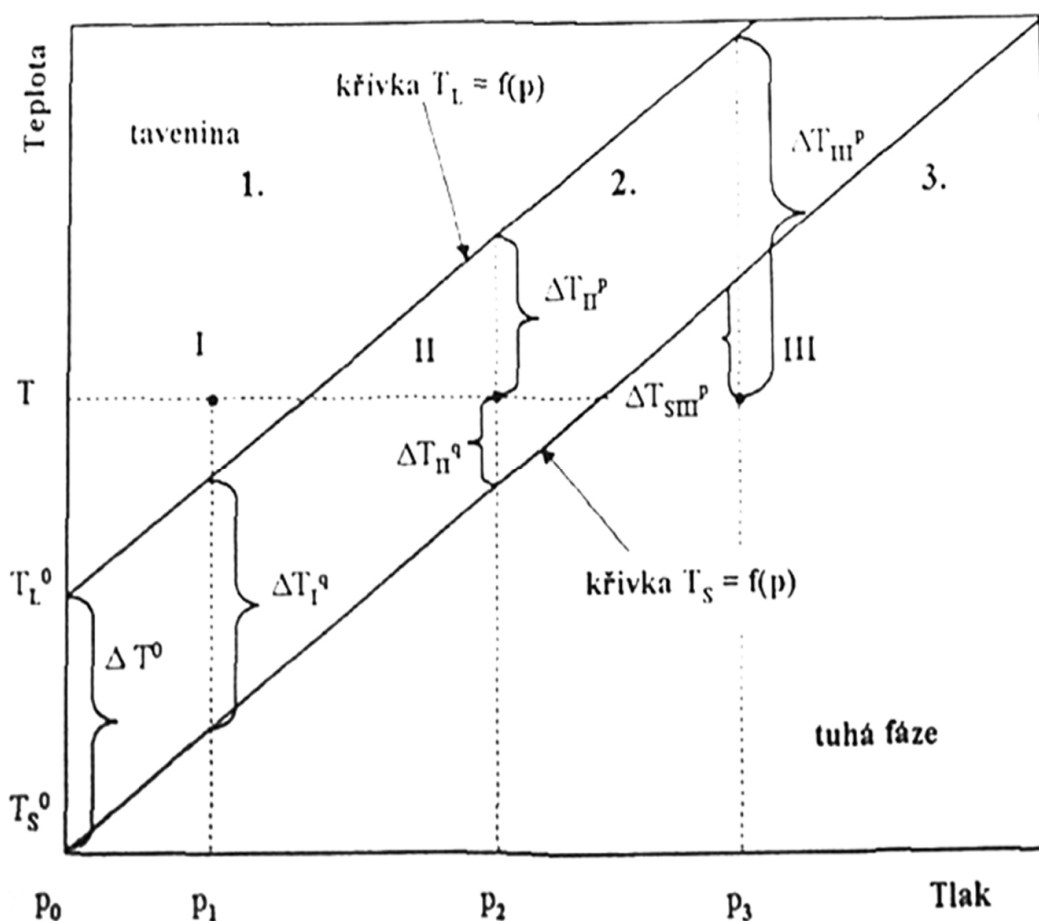
Při tlaku p^0 (atmosférický tlak) je teplota likvidu T_L^0 , teplota solidu T_S^0 a podchlazení ΔT^0 , tyto podmínky přísluší oblasti 1, ve které se může proces krystalizace taveniny uskutečnit jen v důsledku intenzivního podchlazení, což je typické pro gravitační lití do kovových forem. [20]

Je-li tlak na taveninu vyšší než p_0 , např. p_1 je teplota T nad křivkou likvidu. Rozdíl teplot likvidu a solidu při tlaku p_1 je ΔT_l^q . Hodnota podchlazení ΔT_l^q se v tomto případě shoduje s teplotou ochlazení ΔT^0 bez působení tlaku. [20]

Při tlaku p_2 jsou podmínky takové, že teplota T je v oblasti 2 (v metastabilním stavu taveniny), průsečík teploty T a tlaku p_2 je označen II. Pak od teploty (resp.

bodu II) do teploty likvidu lze vymezit teplotní interval ΔT_{II}^q (podchlazení při působení tlaku) a od bodu II do teploty solidu teplotní interval ΔT_{II}^q (podchlazení bez působení tlaku). V této oblasti je podchlazení vznikající v důsledku tlaku ΔT_n^p pro zajištění krystalizace nedostatečné, protože teplota T (bod II) není v oblasti pod solidem T_S . Rozhodujícím faktorem je dodatečné podchlazení ΔT_{II}^q . [20]

obr. 20 Vliv teplotně-tlakového stavu na vznik atermického podchlazení taveniny při tlakovém lití [20]



Změna v procesu krystalizace nastává splněním podmínky $T_S^0 < T < T_S^p$. V tomto případě krystalizaci zabezpečuje podchlazení v důsledku tlaku - oblast 3 (metastabilního tuhého stavu). Působením tlaku p_3 na taveninu jsou vytvořeny takové podmínky, že teplota T je v oblasti 3. Zde je průsečík teploty T a tlaku p_3 označen III. Pak od teploty likvidu T_L do bodu III lze vymezit teplotní interval ΔT_{III}^p a od teploty solidu T_S do bodu III teplotní interval ΔT_{SIII}^p . Výsledná hodnota podchlazení ΔT_{III}^p převyšuje hodnotu ΔT^0 , tím více, čím více je tavenina v okamžiku působení tlaku podchlazená a platí: $\Delta T_{III}^p = \Delta T^0 + \Delta T_{SIII}^p$. Z uvedeného plyne, že intenzita odvodu tepla krystalizující taveniny je v procesu krystalizace určující v případě, že $\Delta T^0 > \Delta T_S^p$. V opačném případě, když $\Delta T^0 < \Delta T_S^p$, sehrává v procesu krystalizace vedoucí úlohu tlak. [20]

Z analýzy vlivu tlaku na proces krystalizace vyplývá, že nutnou podmínkou pro uskutečnění krystalizace taveniny v celém objemu odlitku je dosažení takové

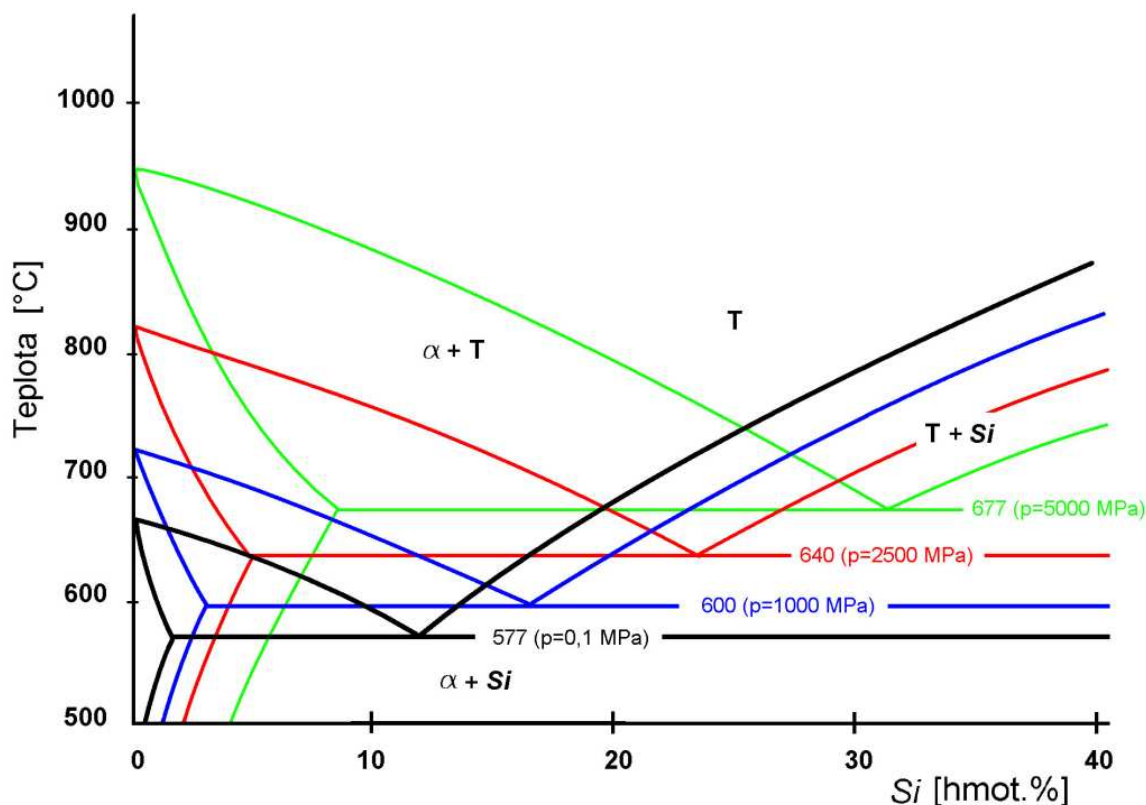
hodnoty tlaku v tavenině, která zaručí nárůst teploty krystalizace podle vztahu. [20]:

$$T_L^P \geq (T_L^0 + \Delta T_L) \quad (11)$$

kde: T_L^P - teplota likvidu za působení tlaku [°C, K]
 T_L^0 - teplota likvidu bez působení tlaku [°C, K]
 ΔT_L - zvýšení teploty taveniny v důsledku uvolňování latentního krystalizačního tepla LKR [°C, K]

Pokud na krystalizující taveninu Al-Si působí zvýšený tlak, dochází ke změně vzhledu rovnovážného diagramu. Z obr. 20 je zřejmé, že při tlaku 5000 [MPa] je eutektická teplota 677 [°C] a oblast tuhého roztoku při této teplotě činí cca 33 [hmot. % Si]. Teplota tavení čistého hliníku se při lití s tuhnutím pod tlakem zvyšuje asi o 6,3 [°C] na každých 100 [MPa]. V případě čistého křemíku dochází při dodržování stejných podmínek k poklesu teploty tavení o 5,8 [°C]. Také bod eutektické krystalizace se s každým 1 [MPa] posouvá o 0,03 [hmot.% Si] k vyššímu obsahu křemíku. Maximální mez rozpustnosti křemíku v hliníku při teplotě eutektické přeměny se s tlakem 100 [MPa] posouvá o 0,25 [hmot. % Si]. Mění se též rozpustnost jiných prvků v tuhém roztoku α . Tyto změny se projevují zvýšením podílu primárně vylučované α -fáze ve struktuře odlitku, snížením podílu eutektika a nárůstem obsahu křemíku v eutektiku. [20]

obr. 21 Vliv tlaku na vzhled rovnovážného diagramu Al-Si [15]



2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část je zaměřena na získání výsledků, jejich popisu, metod měření a následném vyhodnocení. Cílem experimentální části a celé práce je porovnání mých výsledků s výsledky z předchozích diplomových prací studentů VUT FSI v Brně. Především pak práce J. Lefnera [6], od kterého byly převzaty vzorky a znovu na nich bylo prováděno hodnocení porezity a k mým výsledkům byly přidány ještě hodnoty z práce P. Klocové [21] a z práce J. Svobody [22]. Nejprve jsou tedy vyhodnoceny mé hodnoty a v další části je k nim připočten soubor hodnot z [6,21,22]. Vzorky byly odebrány z tlakově litého bloku tříválcového motoru. Popřípadě byly odebrány z bloku odlitého s použitím lokálního dotlačování v podniku Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav. Na vzorcích se zjišťoval vliv porezity na mechanické vlastnosti.

2.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti AlSi9Cu3

Odlitek je ze slitiny AlSi9Cu3 – ČSN EN 1706 (EN AC-46500). Chemické složení je uvedeno v tab. 8. Ostatní prvky jsou ve stopovém množství. Chemické složení bylo zjištěno na spektrometru LECO v Mladé Boleslavi.[6]

tab. 8 Chemické složení slitiny AlSi9Cu3 podle normy DIN EN 1706 [6]

Chemické složení v hmotnostních %											
Al	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Sn	Cr	Ti	Pb
zbytek	8,5 - 10,0	2,0 - 3,5	0,1 - 0,5	0,1 - 0,4	max. 1,0	max. 1,2	max. 0,3	max. 0,1	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,2

Mechanické vlastnosti dané slitiny :

- mez pevnosti $R_m = 240 \text{ MPa}$
- smluvní mez kuzu $R_{p0,2} = 140 \text{ MPa}$
- tažnost $A = 1\%$
- tvrdost $HB = 80$

2.2 Zkoumané odlitky

Jedná se o odlitky spodního dílu stávajícího a nového bloku motoru R 03D 103 166 H. Z těchto odlitků byly vyříznuty části, aby na nich mohly být následně provedeny mechanické a strukturní zkoušky. Na obr. 22 až 26 jsou popsány příslušné dílce bloku nového i stávajícího s naznačením odběrových míst pro vzorky. [6]

V tab. 9 jsou uvedeny parametry lití pro spodní díl bloku motoru (válců) s rozlišením, zda-li jde o typ s lokálním dotlačováním (LSC), či bez něj (nový blok motoru).

Tab. 9 Parametry lití spodního dílu R 03D 103 166 H [6]

Typ odlitku	R 03D 103 166 H s LSC	R 03D 103 166 H bez LSC
Teplota udržovací	665 °C	660 °C
1. rychlost [m/s]	0,15	0,15
2. rychlost [m/s]	5,01	5,5
Dotlak [bar]	269	320
Tlak LSC [bar]	500-600	---
Tuhnutí [sec]	30	30
1. dráha [mm]	150	150
2. dráha [mm]	390	490
3. dráha [mm]	391	410
VAK start [mm]	270	200
VAK stop [mm]	350	350
Takt [sec]	127	127

Legenda k tab.9: Pod pojmem 1.rychlost se rozumí rychlost pístu při zaplňování licí komory a vtokové soustavy, 2.rychlost je rychlost pístu od momentu zaplnění licí komory, kdy se začíná plnit tvarová dutina formy. Dotlak vyjadřuje dodatečné lisování pístu (multiplikace), kdy tlačí píst do zaplněné formy na konci lití (1 bar = 0,1 MPa). Nejedná se o LSC užívaný pro oblast ložisek. Je to tlak vyvolaný hydraulickou soustavou stroje. První až třetí dráha jsou úseky pohybu pístu. Přičemž první dráha představuje vzdálenost, kdy je pístem uzavřen licí otvor. Doba tuhnutí se bere od zaplnění formy po její otevření. [6]

2.3 Výběr vhodného místa ke zkouškám

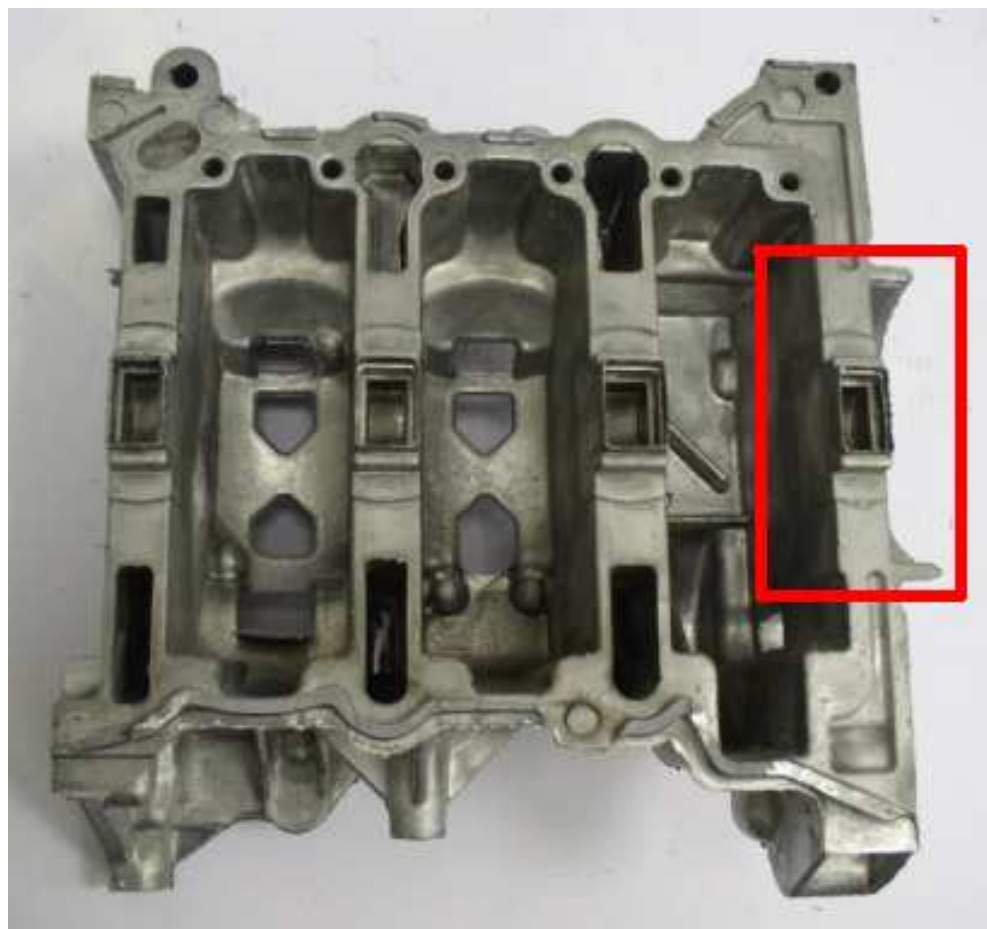
Tlakového lití s lokálním dotlačováním se používá v případech, kdy je nutné zlepšit mechanické i strukturní vlastnosti v namáhaných oblastech odlitku. V tomto případě se jedná o oblasti ložisek, kde je uložena kliková hřídel. U tlakově litých odlitků bez lokálního dotlačování je nutné počítat s tím, že se zvýší procento slévárenských vad, zejména porezity a toto zvýšení se projevuje právě v oblasti ložisek. Nejedná se však o zvýšení vad jen v oblasti ložisek, ale v širším pásmu odlitku. Ovšem v oblasti ložiskového prostoru je toto navýšení vad nejvýraznější, a proto byly ke zkoumání rozdílů mezi oběma typy bloků motoru použity vzorky z 4. ložiskové oblasti obou typů bloků.

Z výše uvedeného vyplývá, že byly na vyznačených místech, *obr. 22 až obr. 25*, vyřezány oblasti 4. ložiska, ze kterých byly poté vyrobeny zkušební tyče pro zkoušku tahem, zkoušku rázem v ohybu a únavovou zkoušku.

obr. 22 Hrubý odlitek spodního dílu R 03D 103 166 H s použitím LSC - stávající blok [6]



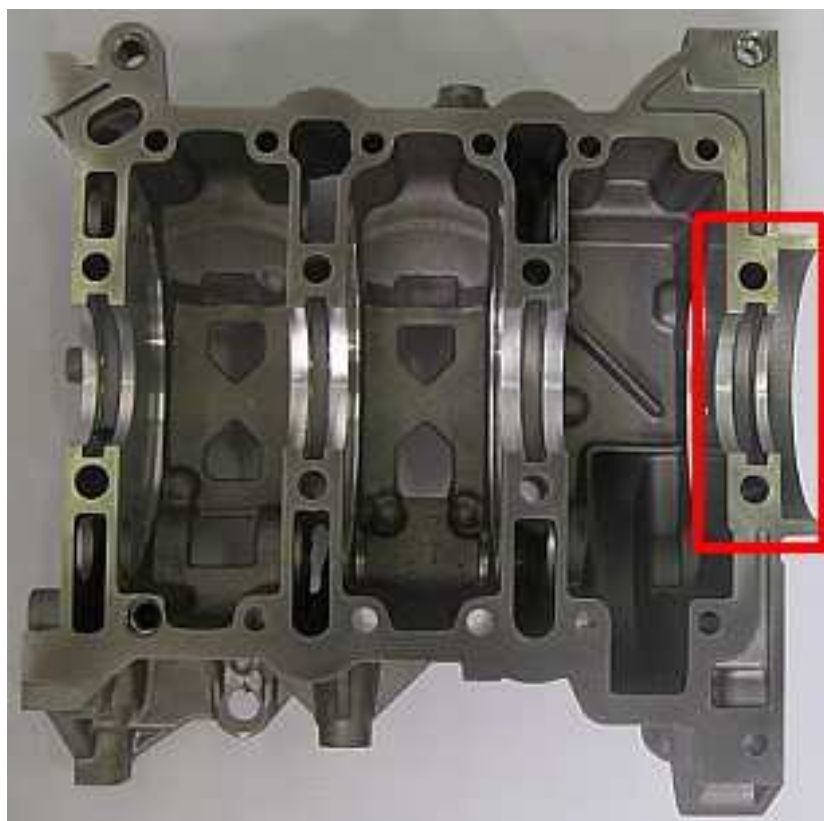
obr. 23 Horní pohled na hrubý odlitek spodního dílu R 03D 103 166 H s použitím LSC - stávající blok [6]



obr. 24 Částečně obrobený odlitek spodního dílu R 03D 103 166 H bez použití LSC - nový blok [6]



obr. 25 Horní pohled na částečně obrobený odlitek spodního dílu R 03D 103 166 H s použitím LSC - nový blok [6]



2.4 Značení a zhotovení vzorků

Značení vzorků, které bude používáno v následujících kapitolách je obdobné jako v práci J. Lefnera. [6], který její část porovnávaných vzorků přímo ve slévárně Škoda Auto, a. s. Mladá Boleslav odlil a následně zpracoval. K jeho a mým výsledkům byly ještě připočteny výsledky z prací [21,22].

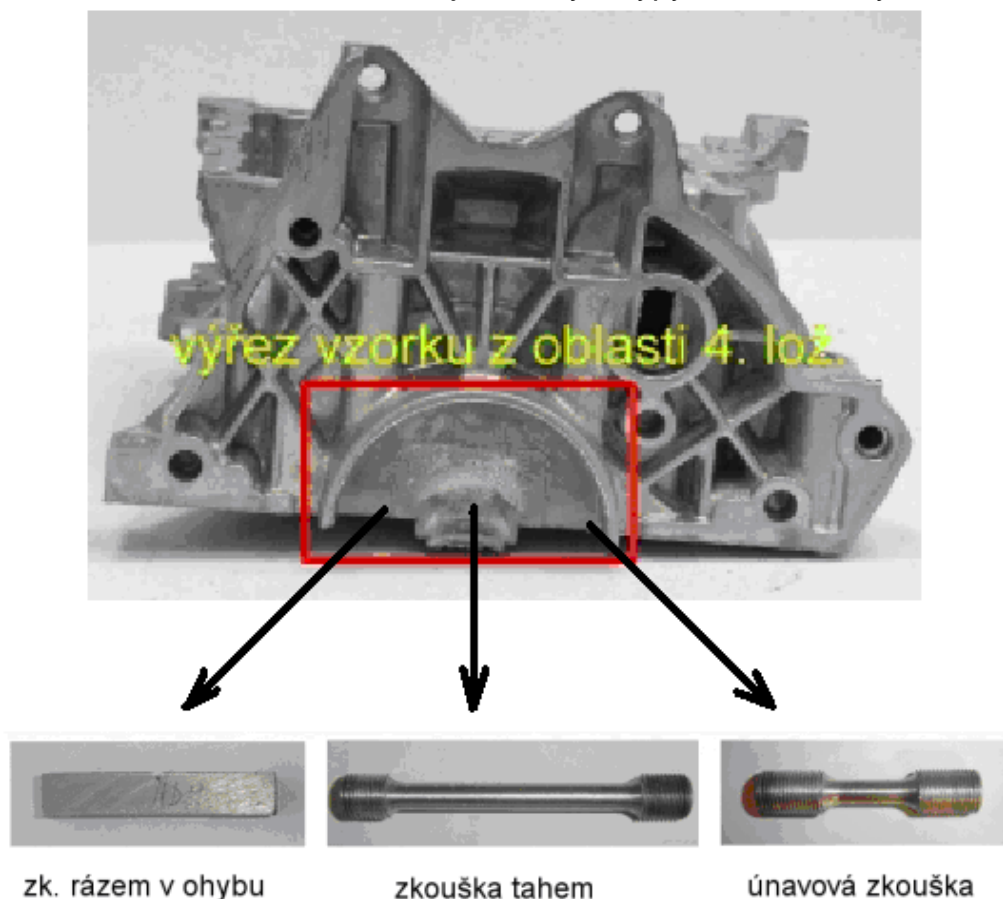
V každé ze dvou taveb byly odlity čtyři spodní díly bloku motoru. Ty byly vyrobeny v různých variantách, které by měly být zárukou různorodosti zjištěných výsledků. Některé odlitky bloků byly tedy odlity za působení místního dolisování – tj. tuhnutí pod tlakem tzv. LSC – local squeeze casting. Další vzorky byly odlity bez působení LSC. V praxi to znamená, že se na okamžik na tlakových odlévacích strojích vypnulo zajištění ocelových dolisovacích hrotů, které zajišťují do tuhnutí odlitku. Bloky byly ve výrobě po odlití žíhány a obráběny.

Na každém výřezu je zaznamenáno datum vzniku odlitku, číslo stroje, směna a pro bezpečnou orientaci zkratka označující, zda-li se jedná o výřez ze spodního dílce. Systematické značení vycházelo z typu dílce, zda-li se jednalo o spodní díl s LSC popřípadě bez něj. Pro rychlou a přehlednou orientaci bylo zavedeno následující značení: [6]

SDS (s LSC) – spodní díl tlakově litý s lokálním dotlakem, stávající blok motoru

SD (bez LSC) – spodní díl tlakově litý bez lokálního dotlaku, nový blok motoru

obr. 26 Naznačená oblast 4. ložiska s jednotlivými typy zkušebních tyčí



Na vyrobených zkušebních tyčích bylo provedeno zjištění mechanických vlastností pomocí tahové zkoušky, zkoušky rázem v ohybu a únavové zkoušky.

Tahové tyčky byly vysoustruženy z výřezů oblasti 4. ložiska, jak je vidět z *obr. 26*. Tahové tyčky bylo nutné před vlastní zkouškou řádně připravit. To spočívalo v zabarvení a ocejchování pracovní části tahové tyčky, aby bylo možné na každém přetrženém vzorku určit prodloužení a zúžení. Každý vzorek byl po přetržení změřen digitálním posuvným měřítkem a zjištěné údaje byly následně zaznamenány do PC. Tahové zařízení bylo elektronicky propojeno s PC, údaje z tahového zařízení a průtahoměru byly zpracovávány v programu. Zkouška dává přehled základních mechanických vlastností zkoumaných vzorků. [6]

Zkouška rázem v ohybu na Charpyho kladivu neboli zkouška náchylnosti materiálu vůči křehkému porušení je prováděna na zkušebních tělesech s defektem (vrub či trhlina), a to při dynamickém rychlém zatěžování. Při zkoušce se zjišťuje velikost nárazové práce nezbytné k porušení zkušební tělesa. Případně lze hodnotit charakter lomu, který může být buď štěpný nebo tvárný. Tato zkouška se používá ke zjištění přechodového jevu tzv. tranzitního chování materiálu, kdy se charakter lomu mění z tvárného ve štěpný (křehký) v případě zatěžování od teplot vyšších k nižším [23].

2.5 Příprava metalografických vzorků

Pro hodnocení porezity bylo nutné vyhotovit metalografické vzorky. Příklad takového vzorku je zobrazen na *obr. 28*. Jako základ posloužily přetržené zkušební tyče ze zkoušky tahem. Z každé zkušební tahové tyče byly po přetržení k dispozici dvě části. K získání co nejvíce vypovídajících údajů bylo rozhodnuto zhotovit z každé zkušební tahové tyče jak podélný, tak příčný řez. Jedna polovina zkušební tyče byla rozřezána podélně a druhá v příčném řezu. Připravené vzorky byly uloženy do označených sáčků pod evidenčním označením totožném s tahovou tyčkou, např. z tahové tyčky označené SD1 vznikl po rozřezání příčný a podélný řez SD1 tak, aby zůstala zachována přehlednost a bylo možné vzorky snadno identifikovat. Dalším pracovním úkolem bylo „zapresování“ vzorků do dentakrylové pryskyřice. [6]

Pro vyhodnocování porezity a pozorování pod mikroskopem bylo nezbytné vzorky ještě připravit. Tato část přípravy se odehrávala v laboratoři na odboru slévárenství, a to na poloautomatické laboratorní leštičce Struers LaboPol-5 *obr. 29, 30*. Do upínací hlavy Struers LaboForce-3 lze vložit tři vzorky, což šetří čas, jelikož jsou broušeny resp. leštěny tři vzorky najednou. K leštění byly použity diamantové pasty s lubrikační složkou DiaDuo se zrnitostí 9 μm , 3 μm a 1 μm . Jedná se o roztok diamantové suspenze a mazadla v jednom. Leštit se začínalo s pastou o zrnitosti 9 μm . Až bylo všech 13 vzorků přeštěně, následoval opětovný proces, s pastou o zrnitosti 3 μm a na konec byly vzorky přeštěně pastou o zrnitosti 1 μm . Ke každé lešticí pastě přísluší daný lešticí kotouč. Tzn. že po leštění pastou o zrnitosti 9 μm se vytáhlo lešticí plátno, které se opláchlo, osušilo a vyměnilo za plátno odpovídající pastě o zrnitosti 3 μm a tak se pokračovalo až byly všechny vzorky přeštěně pastou 1 μm na příslušném plátně. Při leštění byla aktivována funkce automatického dávkování lešticí kapaliny, intenzita injektáže pasty byla nastavena manuálně a to tak, že se rovnoměrně rozetřela po kotouči. Je také třeba podotknout, že po každé výměně

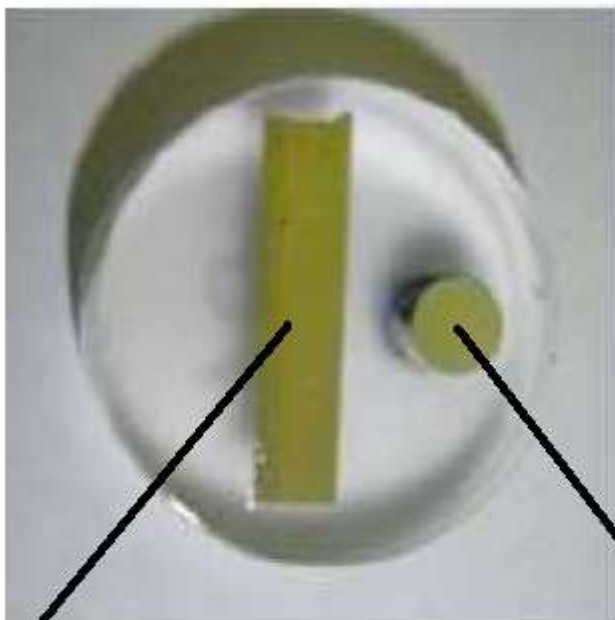
plátina a leštící pasty bylo nutné opláchnout a usušit celý přístroj. Také vzorky se po každém leštění opláchly lihem a následně osušily fénem VAN B522.

Parametry leštění:

- otáčky kotouče 200 ot/min
- průtok leštícího kapaliny byl 5-6 kapek/1min
- doba jednoho leštícího cyklu 4 min
- přítlačná síla byla stanovena na 2,5 čárky na stupnici přístroje

Po leštění bylo nutné vzorky překontrolovat, a to na mikroskopu s trinokulární hlavicí 2303 Intraco micro obr. 31. Tak bylo jednoznačně určeno, které vzorky bude třeba opětovně přeleštit.

obr. 28 Metalografický výbrus vzorku připraveného ke studiu porezity



Podélný řez

Příčný řez

obr. 29 Leštící přístroj Struers LaboPol-5**obr. 30** Přístroj Struers LaboPol-5 a jeho upínací hlava Struers LaboForce-3

obr. 31 Mikroskop 2303 Intraco micro

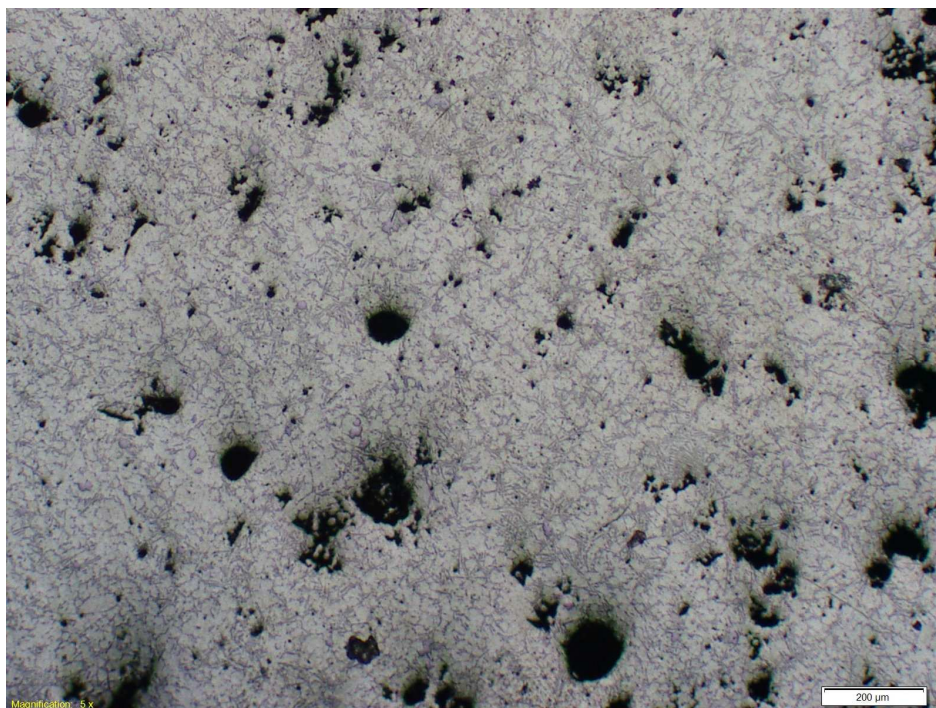
2.6 Hodnocení porezity

Vyhodnocení porezity bylo provedeno na Ústavu materiálového inženýrství. Porezita byla na rozdíl od předešlých diplomových prací vyhodnocována pomocí optické mikroskopie, následného převedení obrazu do rozhraní kamery a konečného vyfocení *obr. 32*. Poté se pořízené fotografie zkopírovali do počítače, kde se zpracovaly metodou obrazové analýzy počítačovým softwarem Stream motion od firmy Olympus. Na takto získaných fotografiích se provádělo vyhodnocování, které je vidět na *obr. 33*. A to tak, že na každém vzorku, jak v příčném, tak v podélném řezu, bylo vybráno pět náhodných míst, na kterých probíhalo vyhodnocení porezity.

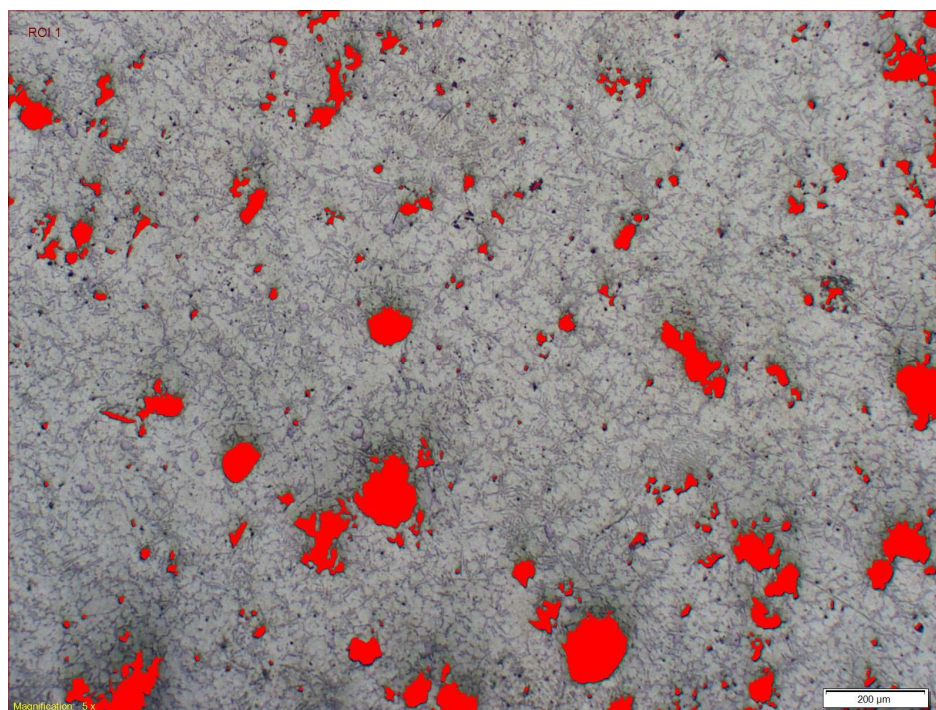
Pro toto vyhodnocení je nezbytné, aby byly zkoumané vzorky dokonale vyleštěny. V opačném případě by program zachycoval rýhy a jiné prohlubně. Měření by pak bylo zkresleno a výsledek porezity by byl vyšší než ve skutečnosti, protože software nerozpozná rýhy od skutečné porezity.

Jedná se o hodnocení porezity, které se děje pomocí grafických filtrů a tyto filtry si ve vyhodnocovaném obrázku najdou barvu, na níž jsou nastaveny. Každý z filtrů má definovanou citlivost, která zamezí zasahování do detekčního pásma filtru jiného. Tak je pokryto definované spektrum. Před měřením je ovšem nutné program nastavit a to tak, aby byly zaznamenávány pouze póry, tak jak je vidět na *obr. 34*. Po tomto nastavení program analyzuje v zadaných obrázcích objekty, které se barevně odlišují od svého okolí a splňují rozměrové a tvarově zadané mezní podmínky. Výsledky všech hodnocených objektů ve vzorku pak program automaticky vkládá do tabulek.

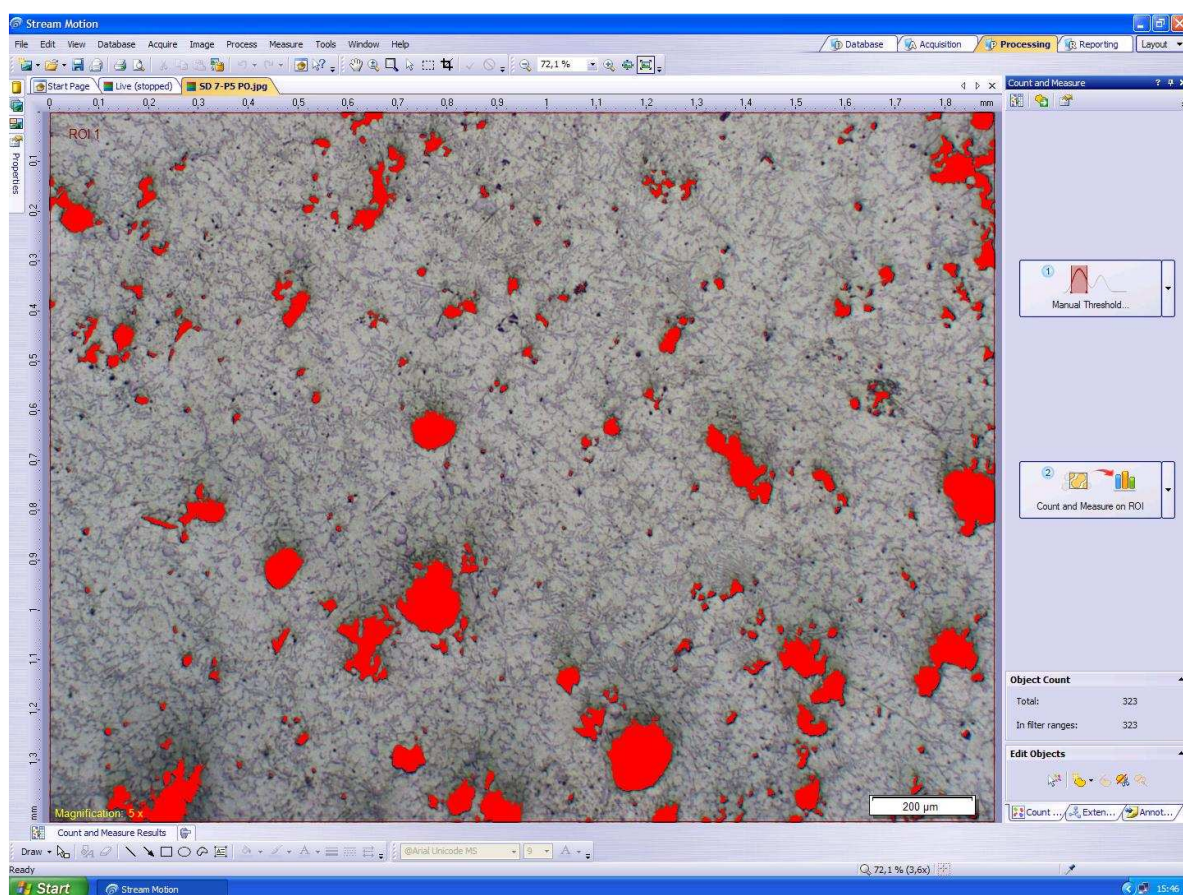
obr. 32 Vyfocený obrázek před vyhodnocením



obr. 33 Vyfocený obrázek po zachycení porezity



obr. 34 Pracovní oblast vzorku, na níž je zachycená porezita v programu Stream motion



2.7 Vyhodnocení měření

V tabulkách 10 a 11 jsou uvedeny hodnoty mnou zjištěné porezity u jednotlivých vzorků a jejich mechanické hodnoty (R_m , $R_{p0,2}$, A), které byly převzaty z práce [6]. V tabulkách se objevuje šedá barva. Touto jsou označeny hodnoty, ve kterých byla zjištěná porezita vyšší než je stanovený limit, kterým se koncern automobilky VW řídí. Tento limit je stanoven na 5% porezity v daném místě. Z těchto tabulek nebyly vytvořeny grafické závislosti, ale byly přičteny k vzorkům s dalších prací [6, 21, 22], a to z toho důvodu, aby bylo hodnocení porezity v závislosti na mechanických vlastnostech komplexnější a věrohodnější. Až teprve z tab. 12 a 14, které tvoří ucelený komplex dat, byly vytvořeny grafické závislosti, které jsou vidět na obrázcích 35 až 38 resp. 39 až 42. Tab. 12 a 14 jsou barevně rozlišeny podle dat, z které práce pochází. Modrou barvou jsou označeny mnou získané vzorky, zelenou jsou označeny vzorky z práce [6], oranžovou vzorky z [21] a žlutou vzorky z práce [22]. Další barva, která se v tabulce vyskytuje je červená. Touto jsou označeny hrubé chyby zjištěné statistickým testováním. Jak bylo řečeno výše, tak hodnoty, které přesahují limit 5 % jsou označeny šedě.

tab. 10 Vyhodnocení mnou naměřené porezity u spodního dílu bez LSC (R 03D 103 166 H)

Označení vzorku	řez	Detekovaná porezita P [%]						R _{p0,2}	R _m	A
		Měření vzorku					Průměrná hodnota P [%]	[MPa]	[MPa]	[%]
SD 1	příčný	1,47	1,33	1,14	2,42	2,63	1,798	136	205	0,8
	podélný	2,73	1,19	3,31	4,04	3,29	2,912			
SD 2	příčný	2,59	4,5	3,1	2,34	5,41	3,588	138	202	0,6
	podélný	1,96	0,3	0,92	1,74	0,99	1,182			
SD 3	příčný	2,54	2,66	2,01	2,78	4,41	2,88	144	201	0,8
	podélný	3,54	3,33	1,96	3,45	1,71	2,798			
SD 4	příčný	3,27	4,08	2,18	3,73	7,02	4,056	129	142	0,4
	podélný	7,17	4,51	4,58	6,81	4,65	5,544			
SD 5	příčný	5,44	3,71	2,01	3,06	2,94	3,432	144	212	0,7
	podélný	3,54	4,63	2,74	4,31	5,42	4,128			
SD 6	příčný	3,81	1,69	4,04	2,04	3,46	3,008	145	208	0,9
	podélný	1,71	3,1	2,67	2,18	2,77	2,486			
SD 7	příčný	1,61	4,94	3,08	2,5	6,11	3,648	138	201	0,7
	podélný	2,52	2,21	2,2	2,4	3,01	2,468			

tab. 11 Vyhodnocení mnou naměřené porezity u spodního dílu s LSC (R 03D 103 166 H)

Označení vzorku	řez	Detekovaná porezita P [%]						R _{p0,2}	R _m	A
		Měření vzorku					Průměrná hodnota P [%]	[MPa]	[MPa]	[%]
								č.1	č.2	č.3
SDS 7	příčný	0,86	0,26	0,19	0,26	0,33	0,38	131	231	2
	podélný	0,18	0,18	0,61	0,78	0,72	0,494			
SDS 8	příčný	0,57	1,86	0,49	0,2	0,61	0,468	123	248	2,2
	podélný	0,82	0,75	1,51	0,62	0,59	0,695			
SDS 9	příčný	0,19	0,15	0,31	0,39	0,11	0,23	124	230	2,3
	podélný	0,27	0,81	0,63	0,12	0,3	0,426			
SDS 10	příčný	1,26	0,32	0,26	0,29	0,43	0,512	129	251	3,3
	podélný	0,17	0,45	0,09	0,1	0,24	0,21			
SDS 11	příčný	0,37	0,4	0,13	0,11	0,26	0,254	145	253	1,8
	podélný	0,43	0,67	0,4	0,63	0,56	0,538			
SDS 12	příčný	0,51	1,12	0,9	0,37	0,43	0,666	150	257	2
	podélný	0,44	0,46	0,4	0,19	0,8	0,458			

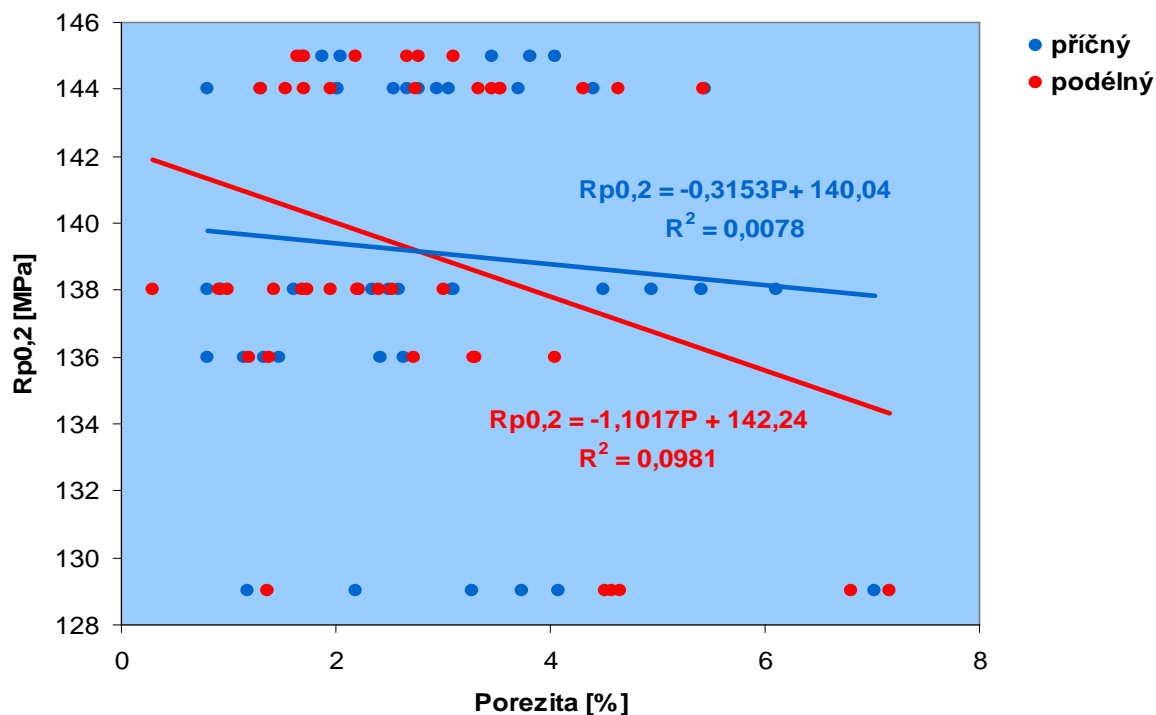
2.7.1 Vyhodnocení měření pro díl litý bez LSC

tab. 12 Celkový soubor dat pro SD vzorky

Označení vzorku	Řez	Průměrná hodnota P [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
SD 1	příčný	1,798	136	205	0,8
	podélný	2,912			
SD 2	příčný	3,588	138	202	0,6
	podélný	1,182			
SD 3	příčný	2,88	144	201	0,8
	podélný	2,798			
SD 4	příčný	4,056	129	142	0,4
	podélný	5,544			
SD 5	příčný	3,432	144	212	0,7
	podélný	4,128			
SD 6	příčný	3,008	145	208	0,9
	podélný	2,486			
SD 7	příčný	3,648	138	201	0,7
	podélný	2,468			
SD 1	příčný	0,8	136	205	0,8
	podélný	1,38			
SD 2	příčný	0,93	138	202	0,6
	podélný	1,42			
SD 3	příčný	1,3	144	201	0,8
	podélný	1,53			
SD 4	příčný	1,18	129	142	0,4
	podélný	1,37			
SD 5	příčný	0,8	144	212	0,7
	podélný	1,31			
SD 6	příčný	1,87	145	208	0,9
	podélný	1,64			
SD 7	příčný	0,8	138	201	0,7
	podélný	1,69			
SD 11	příčný	9,8	109	109	0,2
	podélný	6,63			
SD 12	příčný	3,82	106	108	0,3
	podélný	2,78			
SD 51	příčný	3,8	91	113	0,3
	podélný	5,06			
SD 54	příčný	4,94	0	139	0,2
	podélný	3,86			

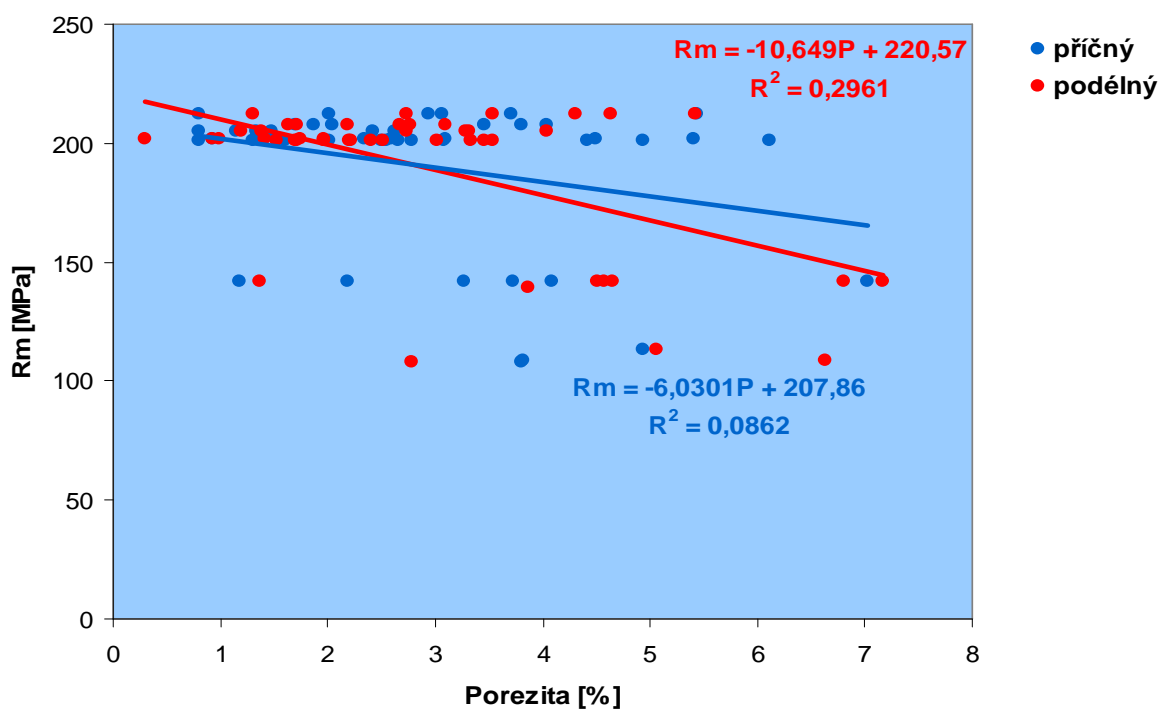
obr. 35 Grafické vyjádření závislosti $R_{p0,2}$ na porezitě v podélném a příčném řezu u vzorků bez LSC

Závislost porezity na $R_{p0,2}$ v podélném a příčném řezu u SD vzorků

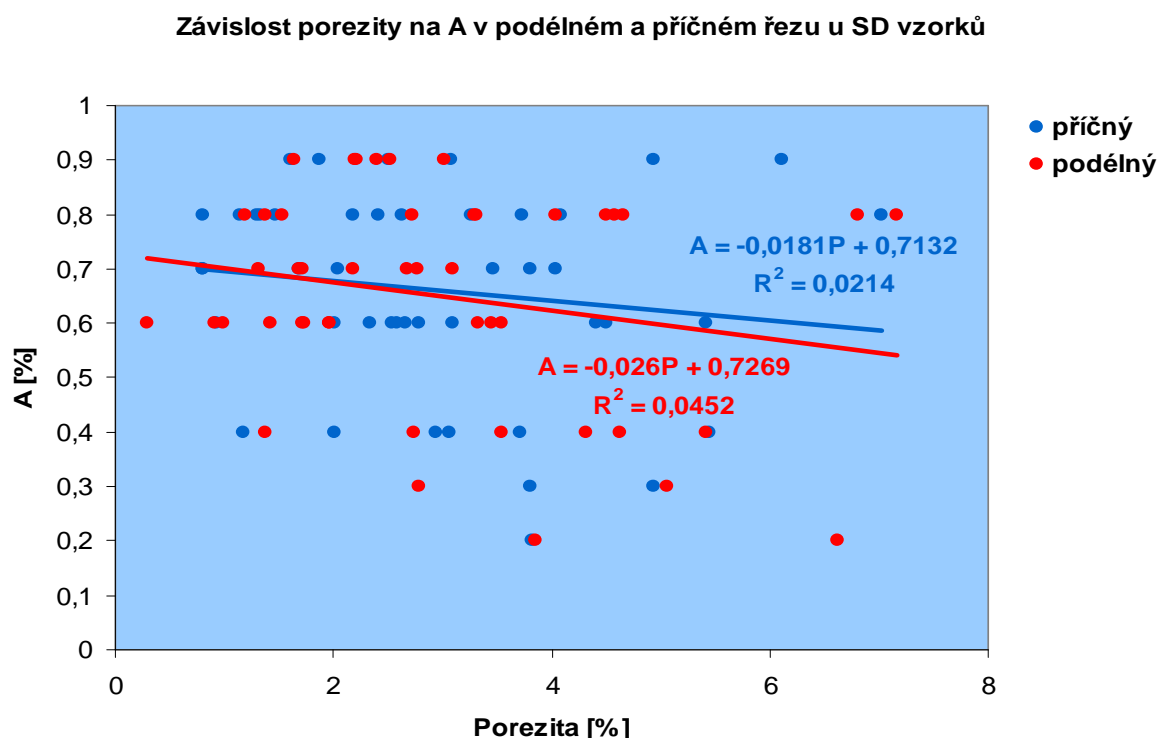


obr. 36 Grafické vyjádření závislosti R_m na porezitě v podélném a příčném řezu u vzorků bez LSC

Závislost porezity na R_m v podélném a příčném řezu u SD vzorků



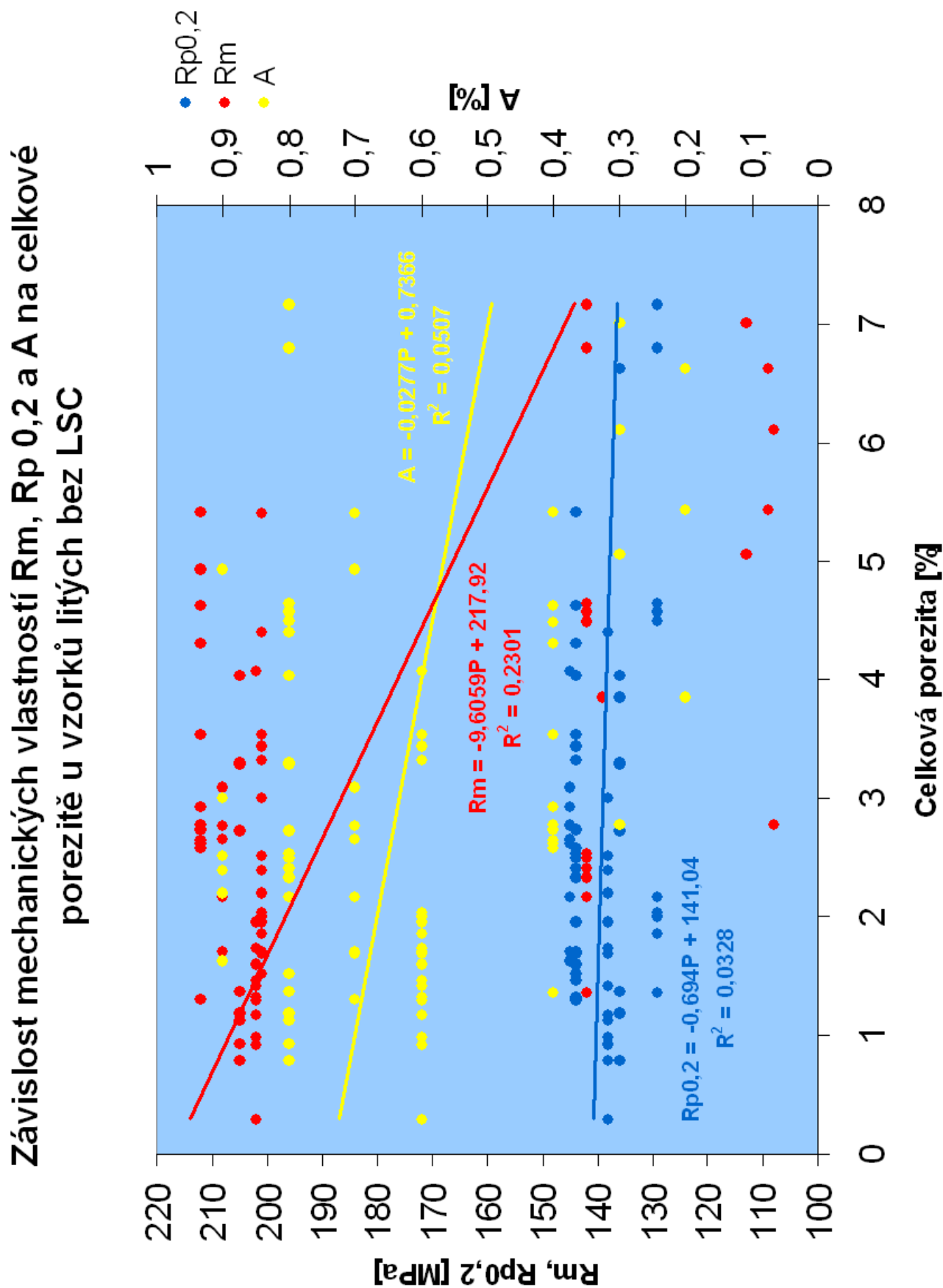
obr. 37 Grafické vyjádření závislosti A na porezitě v podélném a příčném řezu u vzorků bez LSC



tab. 13 Souhrnný přehled rovnic lineárních regresních křivek a koeficientů korelace

SD	řez	rovnice regresních křivek	koeficient korelace
R_{p0,2} = f(P)	podélný	-1,1017P + 142,24	0,0981
	příčný	-0,3153P + 140,04	0,0078
R_{p0,2} = f(P_{celk})		-0,694P + 141,04	0,0328
R_m = f(P)	podélný	-10,649P + 220,57	0,2961
	příčný	-6,0301P + 207,86	0,0862
R_m = f(P_{celk})		-9,6059P + 217,92	0,2301
A = f(P)	podélný	-0,026P + 0,7269	0,0452
	příčný	-0,0181P + 0,7132	0,0214
A = f(P_{celk})		-0,0277P + 0,7366	0,0507

obr. 38 Grafické vyjádření závislosti mezi mechanickými vlastnostmi a celkovou porezitou u vzorků litých bez LSC



2.7.2 Diskuze výsledků k měření pro díl litý bez LSC

Z výše uvedených grafů je možné stanovit následující závěry. Na prvním obrázku tj. na *obr. 35* je patrné, že s rostoucí porezitou klesá smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a to jak u vzorků v příčném řezu, tak u vzorků v podélném řezu. Ovšem u vzorků v příčném řezu je tento pokles smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ podstatně menší než u vzorků v podélném řezu.

S obdobným výsledkem je možné vyhodnotit graf na *obr. 36* tj. závislost meze pevnosti v tahu R_m na porezitě. Podobně jako u předchozího, s rostoucí porezitou klesá mez pevnosti R_m a stejně tak je pokles prudší u vzorků v podélném řezu.

I na *obr. 37* je možné pozorovat podobné tendence, ale v podstatně menší míře. Také s rostoucí porezitou klesá tažnost A , ale zde je pokles tak malý, že je možné ho považovat za zanedbatelný. Proto lze obrazně říci, že porezita u vzorků litých bez LSC nemá na tažnost téměř žádný vliv.

Na *obr. 38* je provedeno celkové srovnání všech vzorků (příčných a podélných) litých bez LSC a opět s obdobnými výsledky. Také lze vidět, že s rostoucí porezitou klesá mez pevnosti v tahu a smluvní mez kluzu. Také tažnost klesá. Největšího poklesu zaznamenává křivka meze pevnosti, kde je při teoreticky nulové porezitě hodnota $R_m=220$ MPa, ale při porezitě cca 7% klesá R_m na hodnotu cca 140 MPa, což není zanedbatelná hodnota. Křivka smluvní meze kluzu má mírnější charakter. Zde je při teoreticky nulové porezitě hodnota $R_{p0,2}$ cca 143 MPa a při porezitě cca 7% klesá na cca 138 MPa. Tzn. že křivka $R_{p0,2}$ téměř nereaguje na rostoucí procento porezity.

2.7.3 Vyhodnocení měření pro díl litý s LSC

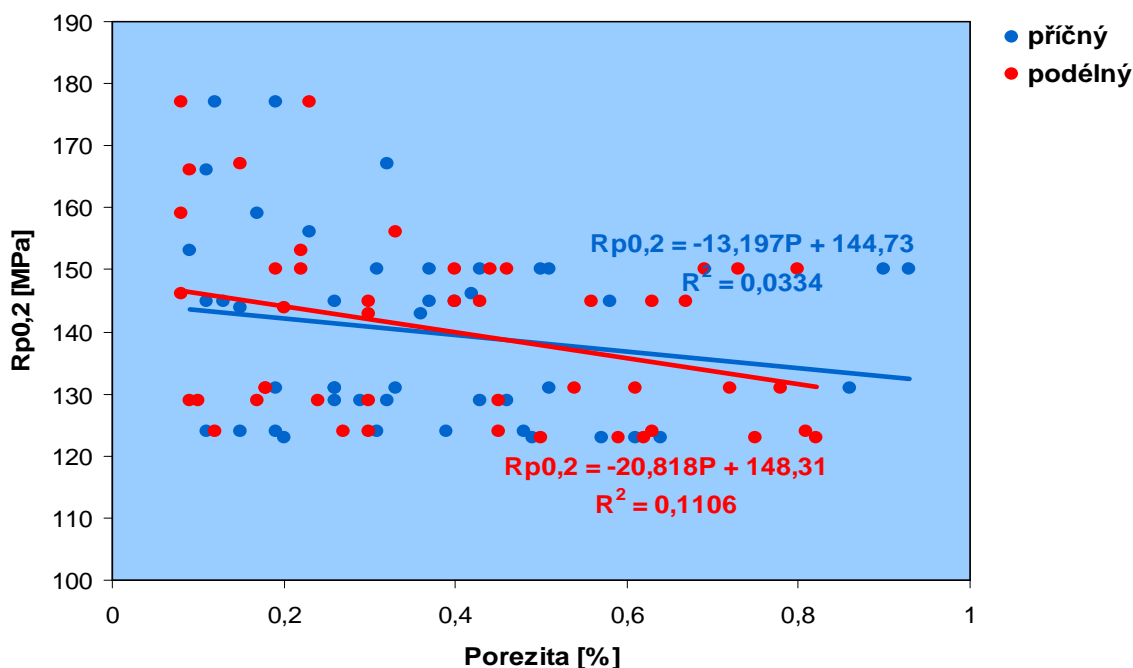
tab. 14 Celkový soubor dat pro SDS vzorky

Označení vzorku	Řez	Průměrná hodnota P [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
SDS 7	příčný	0,38	131	231	2
	podélný	0,494			
SDS 8	příčný	0,746	123	248	2,2
	podélný	0,858			
SDS 9	příčný	0,23	124	230	2,3
	podélný	0,426			
SDS 10	příčný	0,512	129	251	3,3
	podélný	0,21			
SDS 11	příčný	0,254	145	253	1,8
	podélný	0,538			
SDS 12	příčný	0,666	150	257	2
	podélný	0,458			
SDS 7	příčný	0,51	131	231	2
	podélný	0,54			
SDS 8	příčný	0,64	123	248	2,2
	podélný	0,5			

SDS 9	příčný	0,48	124	230	2,3
	podélný	0,45			
SDS 10	příčný	0,46	129	251	3,3
	podélný	0,3			
SDS 11	příčný	0,58	145	253	1,8
	podélný	0,3			
SDS 12	příčný	0,31	150	257	2
	podélný	0,22			
SDS 21	příčný	1,92	190	227	1,1
	podélný	2,78			
SDS 22	příčný	1,45	153	224	1,7
	podélný	4,07			
SDS 24	příčný	0,23	156	232	2,7
	podélný	0,33			
SDS 31	příčný	0,5	150	232	2,6
	podélný	0,73			
SDS 32	příčný	2,19	142	202	1,7
	podélný	2,01			
SDS 33	příčný	0,17	159	229	2,7
	podélný	0,08			
SDS 34	příčný	0,11	166	231	1,2
	podélný	0,09			
SDS 41	příčný	4,17	155	235	2,7
	podélný	1,9			
SDS 42	příčný	0,93	150	175	1
	podélný	0,69			
SDS43	příčný	0,15	144	236	2,5
	podélný	0,2			
SDS 61	příčný	0,12	177	234	1,8
	podélný	0,08			
SDS 64	příčný	0,19	177	252	2,3
	podélný	0,23			
SDS 72	příčný	0,36	143	205	2,7
	podélný	0,3			
SDS 73	příčný	0,32	167	227	2
	podélný	0,15			
SDS 81	příčný	0,09	153	234	2,4
	podélný	0,22			
SDS 83	příčný	0,42	146	237	4
	podélný	0,08			

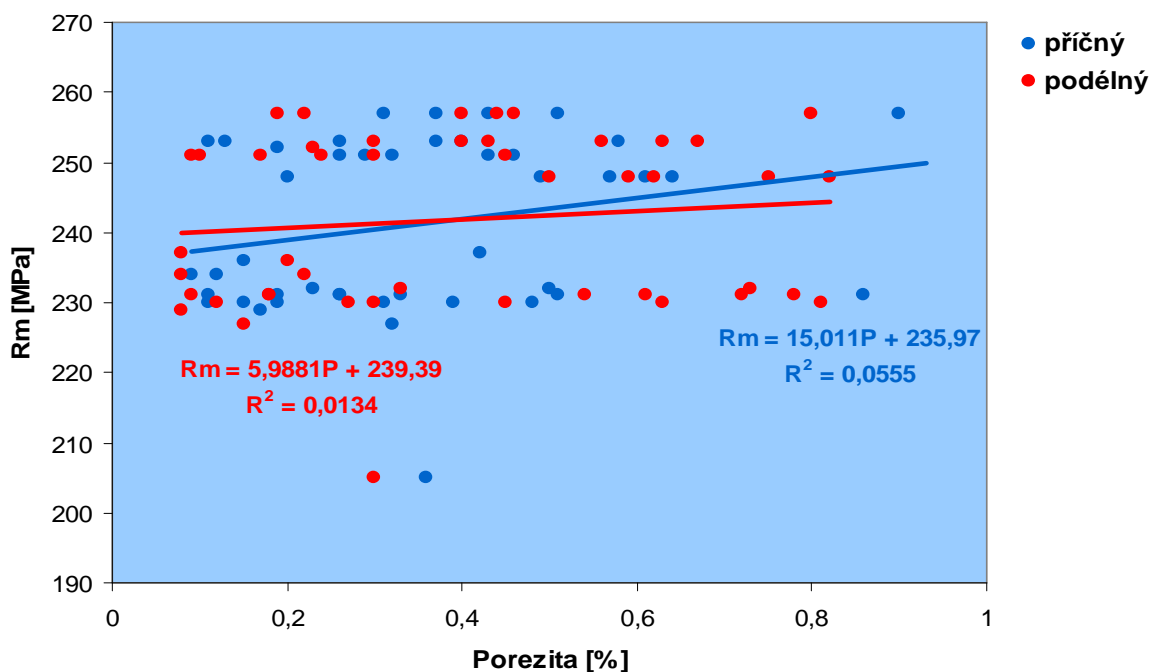
obr. 39 Grafické vyjádření závislosti $R_{p0,2}$ na porezitě v podélném a příčném řezu u vzorků s LSC

Závislost porezity na $R_{p0,2}$ v podélném a příčném řezu u SDS vzorků



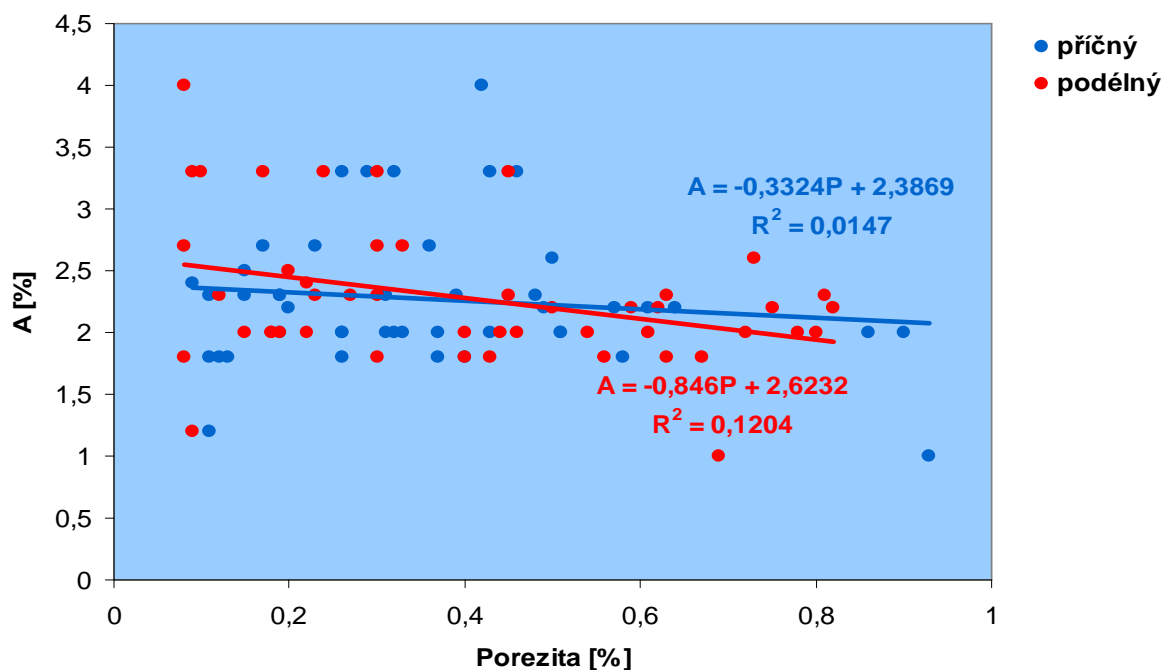
obr. 40 Grafické vyjádření závislosti R_m na porezitě v podélném a příčném řezu u vzorků s LSC

Závislost porezity na R_m v podélném a příčném řezu u SDS vzorků



obr. 41 Grafické vyjádření závislosti A na porezitě v podélném a příčném řezu u vzorků s LSC

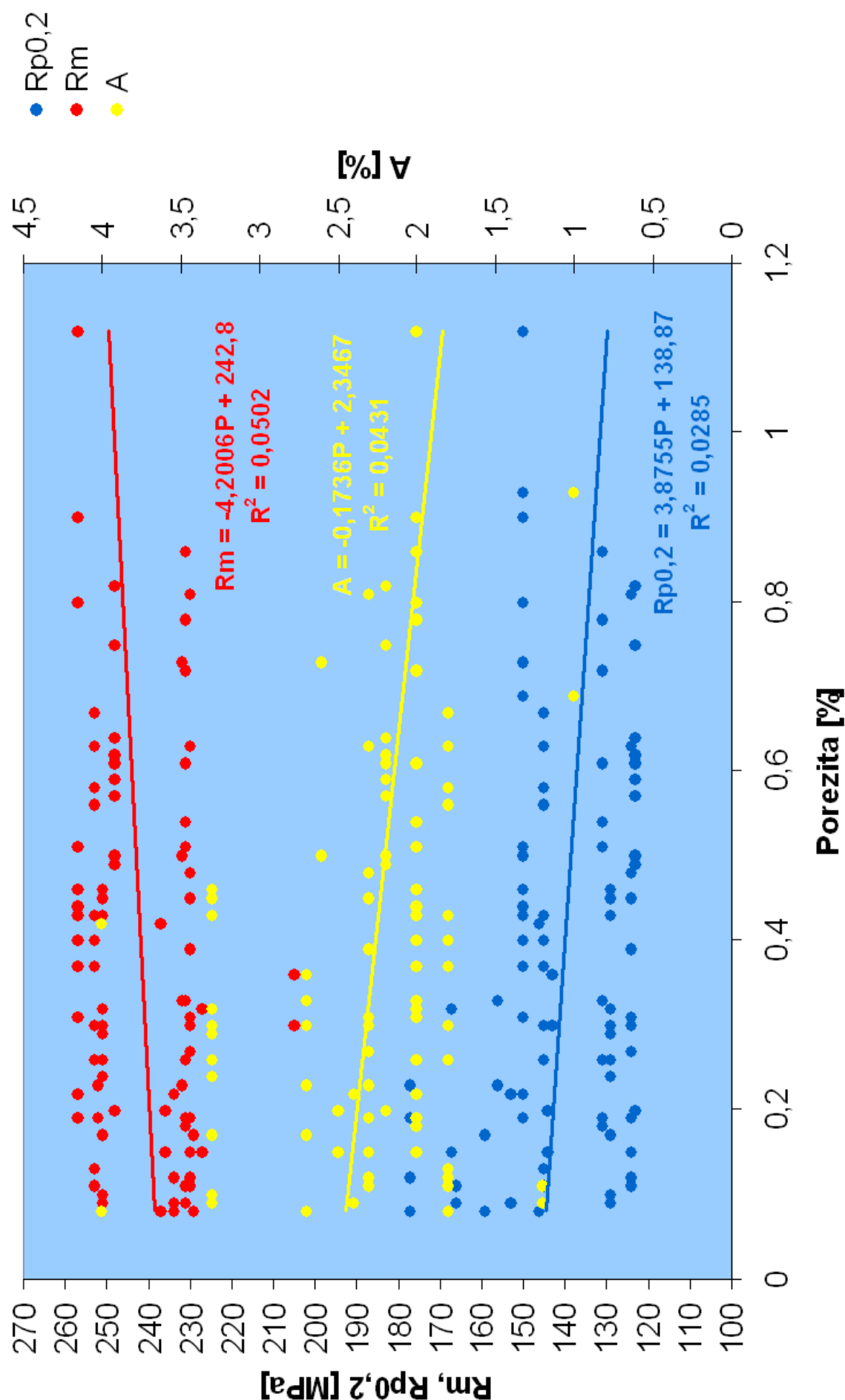
Závislost porezity na A v podélném a příčném řezu u SDS vzorků



tab. 15 Souhrnný přehled rovnic lineárních regresních křivek a koeficientů korelace

SDS	řez	rovnice regresních křivek	koeficient korelace
Rp0,2 =f(P)	podélný	-20,818P + 148,31	0,1106
	příčný	-13,197P + 144,73	0,0334
Rp0,2 =f(Pcelk)		3,8755P + 138,87	0,0285
Rm =f(P)	podélný	5,9881P + 239,39	0,0134
	příčný	15,011P + 235,97	0,0555
Rm =f(Pcelk)		-4,2006P + 242,8	0,0502
A =f(P)	podélný	-0,846P + 2,6232	0,1204
	příčný	-0,3324P + 2,3869	0,0147
A =f(Pcelk)		-0,1736P + 2,3467	0,0431

Závislost mechanických vlastností R_m , $R_{p0,2}$ a A na celkové porezitě u vzorků litých s LSC



obr. 42 Grafické vyjádření závislosti mezi mechanickými vlastnostmi a celkovou porezitou u vzorků litých s LSC

2.7.4 Diskuze výsledků k měření pro díl litý s LSC

Z výše uvedených grafů je možné stanovit následující závěry. Na prvním obrázku tj. na *obr. 39* je patrné, že s rostoucí porezitou klesá smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a to jak u vzorků v příčném řezu, tak u vzorků v podélném řezu. Pokles u příčných i podélných vzorků je mírný.

Na *obr. 40* je graficky vyhodnocena závislost meze pevnosti v tahu R_m na porezitě. Zde je vidět, že s rostoucí porezitou roste mez pevnosti R_m a rostoucí tendence je prudší u vzorků v příčném řezu. Ovšem tento výsledek je v rozporu s teoretickým předpokladem.

Naproti tomu na *obr. 41* je možné pozorovat klesající charakter křivky závislosti tažnosti A na porezitě. Tzn. že s rostoucí porezitou klesá tažnost. Tento pokles je mírně výraznější u vzorků v podélném řezu.

Na *obr. 42* je provedeno celkové srovnání všech vzorků (příčných a podélných) litých s LSC a opět s podobnými výsledky. Také je možné vidět, že s rostoucí porezitou roste mez pevnosti v tahu. Tento výsledek je však v rozporu s teoretickým předpokladem. Naproti tomu křivky smluvní mez kluzu a tažnosti klesají a to tak, že u teoreticky nulové porezity je hodnota tažnosti cca 2,7%, smluvní mez kluzu cca 145 MPa, ale při porezitě 1,3% klesá tažnost na cca 1,8% a $R_{p0,2}$ na cca 135 MPa.

U vzorků litých s LSC je však důležitá ještě jiná věc a to, že hodnoty meze pevnosti a tažnosti jsou podstatně výše než u vzorků litých bez LSC. Výjimku tvoří jen smluvní mez kluzu, u které se pohybují hodnoty v podobném rozmezí a tudíž zde nejsou významné rozdíly mezi SD a SDS. Ještě je třeba zmínit, že u žádného vzorku litého s LSC nebyla překročena porezita 5%, která jak bylo řečeno výše, je stanovena jako limit koncernu automobilky VW.

2.8 Statistické vyhodnocení porezity

Statistické vyhodnocení bylo provedeno v programu Minitab v14. Jako první bylo nutné zjistit, zda se v souboru dat vyskytují hrubé chyby. K tomuto účelu posloužil Grubsovův test. Jeho výsledky jsou uvedeny v tab. 16, ve které jsou uvedeny hodnoty po odstranění hrubých chyb. Hodnoty, které byly vyhodnoceny jako hrubé chyby, jsou označeny v předešlých tabulkách červenou barvou. Tyto vzorky byly z testovaných souborů odstraněny a test byl proveden znovu, na hladině spolehlivosti 95%.

Dalším testem byl test na normální rozdělení (Kolmogorovův test). Byly hodnoceny stejné veličiny jako v předchozím případě. Pomocí tohoto testu lze s 95% spolehlivostí zjistit, zda má, či nemá testovaný soubor normální rozdělení. Některé veličiny podrobené testu měly testovanou veličinu D větší než kritickou hodnotu D_p a neměly tedy normální rozdělení viz. tab.17 Grafické zpracování Kolmogorova testu je provedeno v přílohách.

A posledním testem, který byl proveden byl test linearity souborů. Byla posuzována linearita mechanických veličin R_m , $R_{p0,2}$, A ve vztahu k porezitě tab. 18 a 19. Stanovená hodnota korelace „ r “ byla porovnávána s kritickou hodnotou „ r_p “. V případě linearity odpovídal průběh porezity u testovaných souborů proložené přímkou :

$y = k \cdot P + q$ ymechanická veličina (R_m , $R_{p0,2}$, A)
 ksměrnice přímky
 Pporezita
 qkonstanta přímky

Soubory, u kterých vyšel koeficient korelace (r) menší než kritická hodnota (r_p), tak značí, že jsou dané veličiny na sobě lineárně nezávislé.

tab. 16 Vyhodnocení Grubsova testu

SD				SDS			
veličina	Testovaná veličina T1	Testovaná veličina T2	Kritická hodnota	veličina	Testovaná veličina T1	Testovaná veličina T2	Kritická hodnota
R_m	2,56	0,726	>3,036	R_m	1,245	2,862	>3,036
$R_{p0,2}$	1,866	1,078	>3,036	$R_{p0,2}$	1,115	3,001	>3,036
A	2,280	1,267	>3,036	A	2,101	2,964	>3,036
P_{po}	1,646	2,601	>3,036	P_{po}	1,344	1,744	>3,036
P_{pr}	1,414	2,697	>3,036	P_{pr}	1,292	2,705	>3,036
P_{celk}	1,711	2,723	>3,036	P_{celk}	0,728	3,094	>3,036

tab. 17 Vyhodnocení Kolmogorova testu

SD			SDS		
veličina	Testovaná veličina D	Testovaná veličina Dp	veličina	Testovaná veličina D	Testovaná veličina Dp
R_m	0,312	<0,010	R_m	0,160	<0,010
$R_{p0,2}$	0,115	>0,150	$R_{p0,2}$	0,149	<0,010
A	0,079	>0,150	A	0,145	<0,010
P_{po}	0,111	>0,150	P_{po}	0,115	0,122
P_{pr}	0,106	>0,150	P_{pr}	0,096	>0,150
P_{celk}	0,088	0,081	P_{celk}	0,101	0,028

tab. 18 Vyhodnocení testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace u vzorků SD

SD	Koeficient korelace r	Kritická hodnota r_p	Lineární závislost
Dvojice veličin			
$R_m - P_{po}$	-0,544	0,000	NE
$R_m - P_{pr}$	-0,431	0,003	NE
$R_m - P_{celk}$	-0,491	0,000	NE
$R_{p0,2} - P_{po}$	-0,265	0,075	NE
$R_{p0,2} - P_{pr}$	-0,297	0,045	NE
$R_{p0,2} - P_{celk}$	-0,462	0,000	NE
$A - P_{po}$	-0,213	0,156	NE
$A - P_{pr}$	-0,316	0,032	NE
$A - P_{celk}$	-0,296	0,004	NE

tab. 19 Vyhodnocení testu na nulovou hodnotu koeficientu korelace u vzorků SDS

SDS	Koeficient korelace r	Kritická hodnota r_p	Lineární závislost	Směrnice přímky k	Konstanta přímky q
Dvojice veličin					
$R_m - P_{po}$	-0,249	0,075	NE	---	---
$R_m - P_{pr}$	-0,168	0,233	NE	---	---
$R_m - P_{celk}$	-0,209	0,033	NE	---	---
$R_{p0,2} - P_{po}$	0,185	0,190	NE	---	---
$R_{p0,2} - P_{pr}$	0,152	0,281	NE	---	---
$R_{p0,2} - P_{celk}$	0,169	0,087	ANO	-14,141	145,57
$A - P_{po}$	-0,336	0,015	NE	---	---
$A - P_{pr}$	-0,076	0,594	NE	---	---
$A - P_{celk}$	-0,208	0,034	NE	---	---

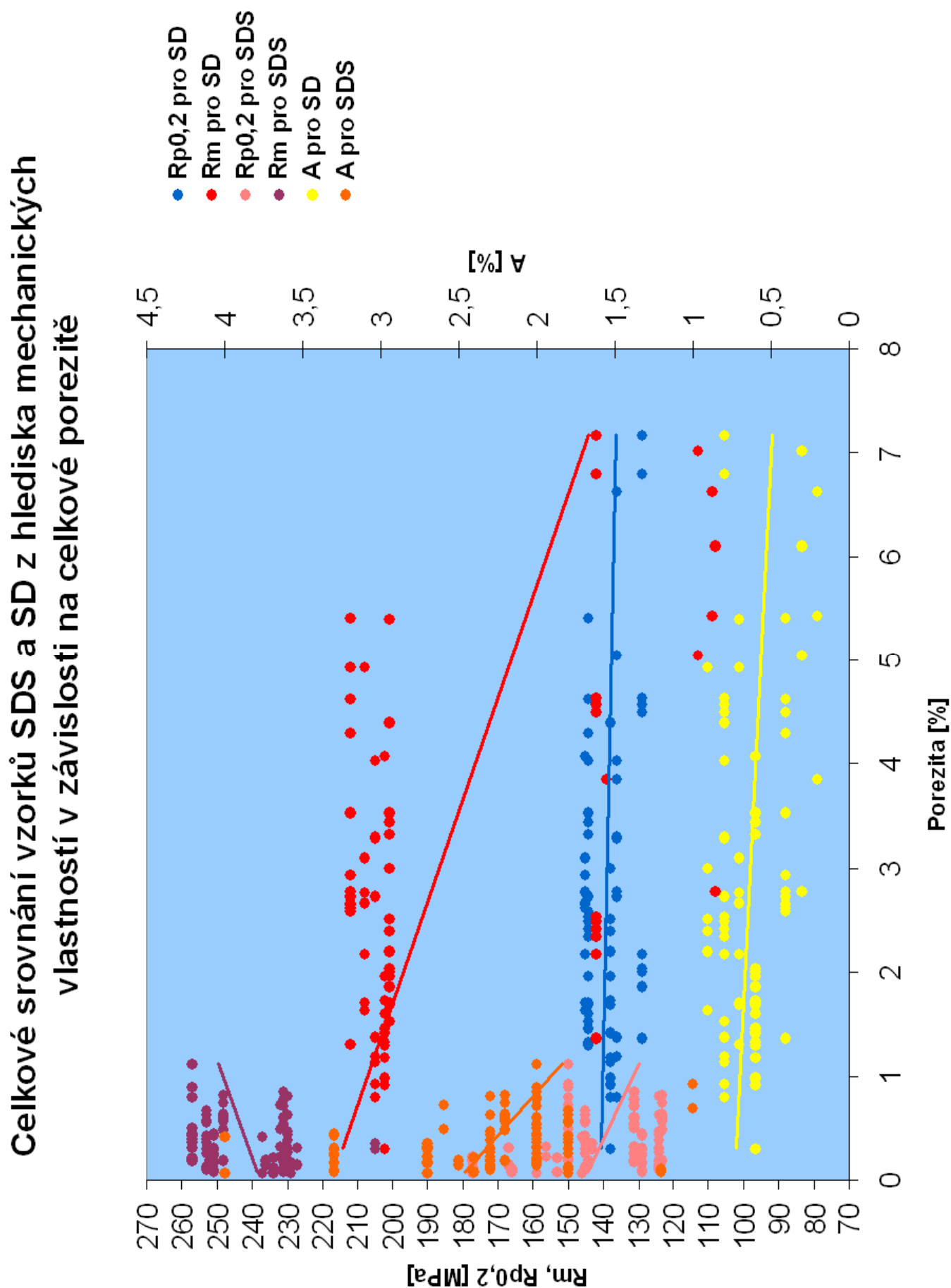
2.9 Vyhodnocení celého měření

tab. 20 Souhrnný přehled porezity u spodního dílu

Označení vzorku	řez	Porezita P [%]	Označení vzorku	řez	Porezita P [%]
SDS 7	příčný	0,38	SD 1	příčný	1,798
	podélný	0,494		podélný	2,912
SDS 8	příčný	0,746	SD 2	příčný	3,588
	podélný	0,858		podélný	1,182
SDS 9	příčný	0,23	SD 3	příčný	2,88
	podélný	0,426		podélný	2,798
SDS 10	příčný	0,512	SD 4	příčný	4,056
	podélný	0,21		podélný	5,544

SDS 11	příčný	0,254	SD 5	příčný	3,432
	podélný	0,538		podélný	4,128
SDS 12	příčný	0,666	SD 6	příčný	3,008
	podélný	0,458		podélný	2,486
SDS 7	příčný	0,51	SD 7	příčný	3,648
	podélný	0,54		podélný	2,468
SDS 8	příčný	0,64	SD 1	příčný	0,8
	podélný	0,5		podélný	1,38
SDS 9	příčný	0,48	SD 2	příčný	0,93
	podélný	0,45		podélný	1,42
SDS 10	příčný	0,46	SD 3	příčný	1,3
	podélný	0,3		podélný	1,53
SDS 11	příčný	0,58	SD 4	příčný	1,18
	podélný	0,3		podélný	1,37
SDS 12	příčný	0,31	SD 5	příčný	0,8
	podélný	0,22		podélný	1,31
SDS 21	příčný	vyřazeno	SD 6	příčný	1,87
	podélný	vyřazeno		podélný	1,64
SDS 22	příčný	vyřazeno	SD 7	příčný	0,8
	podélný	vyřazeno		podélný	1,69
SDS 24	příčný	0,23	SD 11	příčný	vyřazeno
	podélný	0,33		podélný	6,63
SDS 31	příčný	0,5	SD 12	příčný	3,82
	podélný	0,73		podélný	2,78
SDS 32	příčný	vyřazeno	SD 51	příčný	3,8
	podélný	vyřazeno		podélný	5,06
SDS 33	příčný	0,17	SD 54	příčný	4,94
	podélný	0,08		podélný	3,86
SDS 34	příčný	0,11			
	podélný	0,09			
SDS 41	příčný	vyřazeno			
	podélný	vyřazeno			
SDS 42	příčný	0,93			
	podélný	0,69			
SDS43	příčný	0,15			
	podélný	0,2			
SDS 61	příčný	0,12			
	podélný	0,08			
SDS 64	příčný	0,19			
	podélný	0,23			
SDS 72	příčný	0,36			
	podélný	0,3			
SDS 73	příčný	0,32			
	podélný	0,15			
SDS 81	příčný	0,09			
	podélný	0,22			
SDS 83	příčný	0,42			
	podélný	0,08			
Průměrná porezita P [%]	příčný	0,39	Průměrná porezita P [%]	příčný	2,51
	podélný	0,35		podélný	2,79
Celkový průměr P [%]	0,37		Celkový průměr P [%]	2,65	

obr. 43 Celkové srovnání mechanických vlastností v závislosti na poretě SD a SDS vzorků



3. ZÁVĚR

Záměrem této práce bylo navázat na předešlé práce, prostudovat a změřit porezitu u odlitků spodního dílu tříválcového motoru ze slitiny AlSi9Cu3 , které byly odlity dvěma způsoby a to tlakovým litím a tlakovým litím s lokálním dolisováním (dotlačováním). Jako základ pro vyhodnocení posloužily vzorky z práce J. Lefnera [6], které byly znovu vyhodnocovány na porezitu a jejího vlivu na mechanické vlastnosti. Vyhodnocení se však od zmíněné práce liší. Blíže je popsáno v kapitole 2.6. Dále byly použity vzorky z prací P. Klocové [21] a J. Svobody [22]. Celkově se tedy porezita vyhodnocovala z prací [6,21,22] a k těmto byly přičteny mnou zjištěné hodnoty.

Na výše uvedených obrázcích v kap 2.9 je srovnávána porezita a její vliv na mechanické vlastnosti. Na *obr. 43* je znázorněn graf, na kterém je srovnána porezita u vzorků litých bez lokálního dotlačování a vzorků litých za pomoci lokálního squeeze castingu. Je zde vidět patrný rozdíl mezi těmito vzorky, který potvrzuje i tab. 20. Zatímco porezita u SD vzorků byla v průměru 2,65 %, tak u SDS vzorků byla podstatně nižší a to v průměru 0,37 %. Od toho se také odvíjí grafické vyjádření na *obr. 43*, na kterém jsou vyznačeny závislosti mechanických vlastností $R_{p0,2}$, R_m v MPa a A v % na porezitě v %.

V grafu jsou znázorněny obě skupiny vzorků podle způsobu lití. Jedná se o vzorky tlakově lité bez LSC tj. SD vzorky a lité tlakově s lokálním dolisováním tj. SDS vzorky. Na ose x je vynesena porezita v procentech a na ose y je společná stupnice pro mez pevnosti R_m i smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ v MPa, na vedlejší osu y byla vynesena tažnost A v procentech. Pro lepší orientaci je ke grafu připojena legenda, ve které jsou křivky označeny popiskami a barevně odlišeny. Z grafu jsou patrné závěry, které se opakují v předešlých kapitolách 2.7.2 a 2.7.4. Křivka meze pevnosti R_m s lokálním dolisováním (R_m pro SDS) stoupá postupně s přibývajícím procentem porezity. Tj. čím vyšší hodnota porezity, tím je vyšší hodnota meze pevnosti R_m . Tento závěr je ovšem nepravděpodobný. Co je však podstatnější, tak se hodnoty meze pevnosti pohybují v rozmezí od 230 MPa do 257 MPa. Křivka meze pevnosti R_m bez lokálního dolisování (bez LSC) má klesající tendenci, což je se předpokládalo, avšak s nižšími hodnotami, které se pohybují v rozmezí od 142 MPa do 212 MPa. Obrazně lze říci, že tam kde končí klasicky tlakově odlité vzorky, tam nastupují vzorky se squeeze castingem.

Také porezita u SD vzorků je podstatně vyšší než u SDS vzorků. Zatímco u vzorků bez LSC se pohybují hodnoty od cca 0,2% až po cca 7 %, tak u vzorků s LSC se pohybují hodnoty od 0,1% do cca 1%.

U křivek smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$, se téměř neprojevuje vliv lokálního dolisování, poněvadž se hodnoty od sebe výrazně neliší a tudíž se i tyto křivky vyskytují v těsné blízkosti. Rozmezí, ve kterém se pohybují hodnoty pro smluvní meze kluzu, je od cca 129 MPa do 145 MPa pro vzorky bez LSC a od cca 125 MPa do 150 MPa pro vzorky s LSC. Také procento porezity výrazně neovlivňuje smluvní mez kluzu. U vzorků s LSC je pokles mírně prudší, ale nikterak extrémní.

Dále je možné z grafu na *obr. 43* vidět porovnání SD a SDS křivek tažnosti A v závislosti na porezitě. Jak je vidět, tak křivka pro SDS vzorky je nad křivkou vzorků litých bez LSC. Obě však mají sestupnou tendenci. U křivky SD vzorků je pokles tažnosti pozvolný, téměř lze říci, že je neznatelný. Naproti tomu u SDS vzorků klesá s rostoucí porezitou tažnost rychleji, tzn. že tažnost u vzorků s LSC citlivě reaguje na procento porezity. Hodnoty tažnosti se pohybují v rozmezí od 0,2

% do 0,9 % pro vzorky lité bez LSC a od 1 % do 4 % pro vzorky lité s lokálním dotlačováním.

Po celkovém měření a provedení veškerých zkoušek lze říci, že vzorky z odlitku spodního dílu odlitého bez lokálního dotlaku (bez LSC) vykazují ve většině případů horší výsledky. Tedy mechanické vlastnosti se snižují s navýšením porezity. Co je však neméně důležité, tak navýšení porezity u některých vzorků SD přesahuje danou hranici, která je stanovena koncernovou normou na 5% a hrozí tak riziko vzniku netěsností a dalších možných problémů spojených s vyšším procentem porezity. Odlitky je třeba vyřadit, a tak se výroba může prodražit. U vzorků s LSC se k této limitní hodnotě žádný z vzorků ani zdaleka nepřibližuje. Na druhou stranu u vzorků litých bez LSC lze uspořít na výrobě kovové formy. Z tohoto vyplývá, že je třeba porovnat všechna pro a proti a pokud by bylo možné bloky motoru odlévat se zaručenou porezitou nižší než 5% bez lokálního dolisování, tak se vyplatí přejít na tuto technologii odlévání. Ekonomické hledisko hraje podstatnou roli při výběru dané technologie, ovšem to nebylo předmětem této práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MICHNA, Štefan, et al. Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Děčín : ALCAN, 2005. 699 s. ISBN 80-89041-88-4.
2. ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
3. NOVÁKOVÁ, I; HOŠEK, Z; NOVÁ, I. Rozvoj tlakového lití. *MM Průmyslové Spektrum*. 17. května 2004 , č.5, s. 79. [cit. 2011-3-23]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rozvoj-tlakoveho-liti>
4. *FAQ about Die Casting*[online]. [cit. 2009-05-16]. Dostupné z WWW: <http://www.diecasting.org/faq/>
5. Ukázky odlitků [online]. [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW: http://www.kovolit.cz/text/Slevarna_produkty.jpg
6. LEFNER, J. *Hodnocení mechanických a strukturních vlastností nového bloku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 115 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.
7. MICHNA, Š. *Progresivní technologie odlévání* [online], [cit. 2009-05-20]. Dostupné z WWW : http://www.stefanmichna.com/download/progresivnitechnologie/progresivni_technologie_odlevani.pdf
8. HERMAN, A. *Modifikace tlakového lití* [online], [cit. 2011-03-23]. Dostupné z : <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/modifikace_tlakoveho_liti.pdf >
9. ELBEL, Tomáš. *Základy slévárenské technologie od historie po současnost* [online]. 9.2.2009 [cit. 2011-03-23]. Dostupný z WWW: <<http://fmmi10.vsb.cz/632/>>.
10. JIRKŮ, Lukáš. *Hodnocení porezity u tlakově litých odlitků z Al-slitiny*. Brno, 2007. 138 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.
11. MATULA, Libor. *Tlakové lití-HPDC*. návody do cvičení-firemní literatura. Brno(CZ): Kovolit a.s.
12. *KEY to METALS* [online]. 22. 2. 2011 [cit. 2011-05-18]. Squeeze Casting Process: Part One. Dostupné z WWW: <<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=172> >.
13. *TheMetalCasting.com* [online]. 23.4.2008 [cit. 2011-05-18]. Squeeze Casting. Dostupné z WWW: <<http://www.themetalcasting.com/squeeze-casting.html>>.
14. *Alibaba.com* [online]. 20.10.2009 [cit. 2011-05-18]. Metals Knowledge: Squeeze Casting Process: Part Two. Dostupné z WWW: <<http://news.alibaba.com/article/detail/metalworking/100186517-1-metals-knowledge%253A-squeeze-casting-process%253A.html>>.

15. TUL Katedra strojírenské technologie - oddělení strojírenské metalurgie [online]. 14.5.2008 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf>.
16. SQUEEZE CASTING – JEDNÁ SE O NOVOU TECHNOLOGII?. 12. mezinárodní konference metalurgie a materiálů : METAL 2003 [online]. 22.5.2003, 12, [cit. 2011-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2003/sbornik/papers/38.pdf>>
17. AFS Transactions 2005. Porosity in Castings. In MONROE, R. *Porosity in Castings* [online]. Schaumburg, IL USA : American Foundry Society, 2005 [cit. 2011-05-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.rastgar.com/rec/papers/Porosity%20in%20Castings.pdf>>.
18. STROPPE, Heribert. Einfluss der Porosität auf die mechanischen Eigenschaften von Gußlegierungen. *Giessereiforschung* 52. 2000, Nr.2, s. 58-60.
19. Nováková I., Nová, I.: Struktura vysokotlakých odlitků ze slitin Al-Si, *Slévárnictví* (v tisku) 2008
20. VILČKO, J., DZUGAS, P.: Liatie s tuhnutím pod tlakom odlitkov zo zliatin typu Al-Si – úvod do problematiky technologie výroby vysokokvalitných odlitkov (část I). *Slévárnictví*, 1990, č.12, s. 499-504
21. KLOCOVÁ, Petra. *Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66s., příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.
22. SVOBODA, J. *Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 105 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc
23. PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu I*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

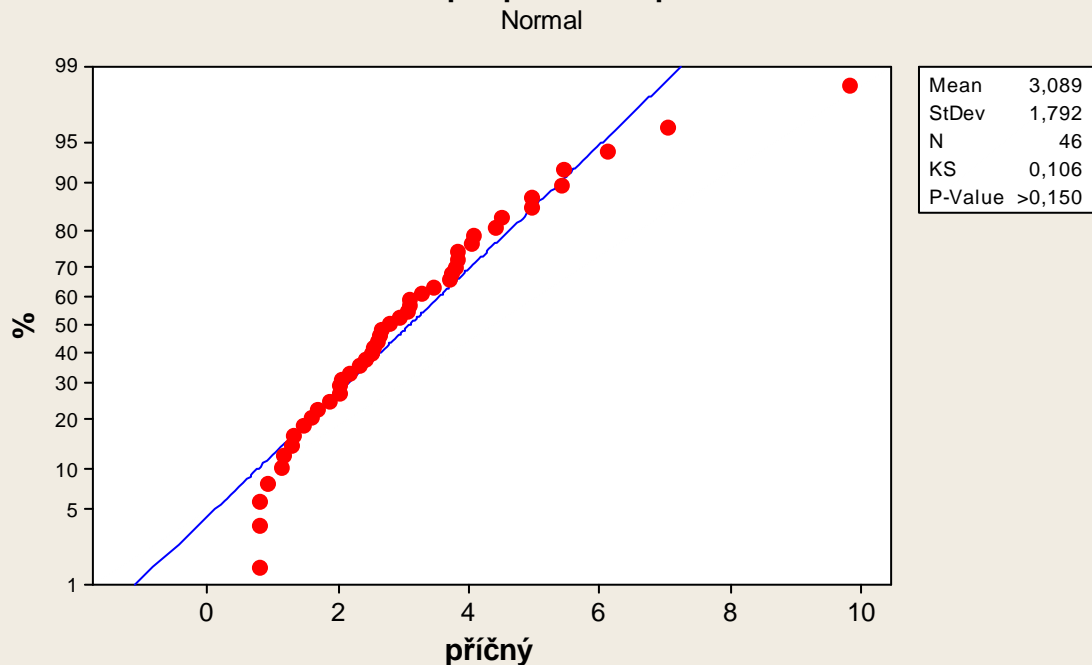
Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
LSC		lokální dotlak při tuhnutí
P	[%]	porezita
r	[mm]	poloměr bubliny
R 03D 103 166H		spodní díl bloku motoru
A	[%]	tažnost
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
s	[-]	faktor kulatosti
p	[MPa]	Tlak
σ	[MPa]	povrchové napětí na rozhraní zárodek – tavenina
p_{atm}	[MPa]	atmosférický tlak
p_{met}	[MPa]	metalostatický tlak
p_σ	[MPa]	tlak vyvolaný povrchovým napětím
σ_{z-t}	[Pa]	povrchové napětí mezi zárodkem a taveninou
σ_{z-p}	[Pa]	povrchové napětí mezi zárodkem a plynem
σ_{p-t}	[Pa]	povrchové napětí mezi plynem a taveninou
U	[m]	obvod plochy dutiny lokalizovaném na metalografickém výbrusu
R_m	[MPa]	mez pevnosti pórovitého materiálu
$R_{p0,2}$	[MPa]	mez průtažnosti pórovitého materiálu
R_m^0	[MPa]	mez pevnosti materiálu bez pórů
$\Delta H_{L,S}^0$	[J.mol ⁻¹]	změna entalpie při krystalizaci
T_L^p	[°C, K]	teplota likvidu za p ůsobení tlaku
T_L^0	[°C, K]	teplota likvidu bez p ůsobení tlaku

SEZNAM PŘÍLOH

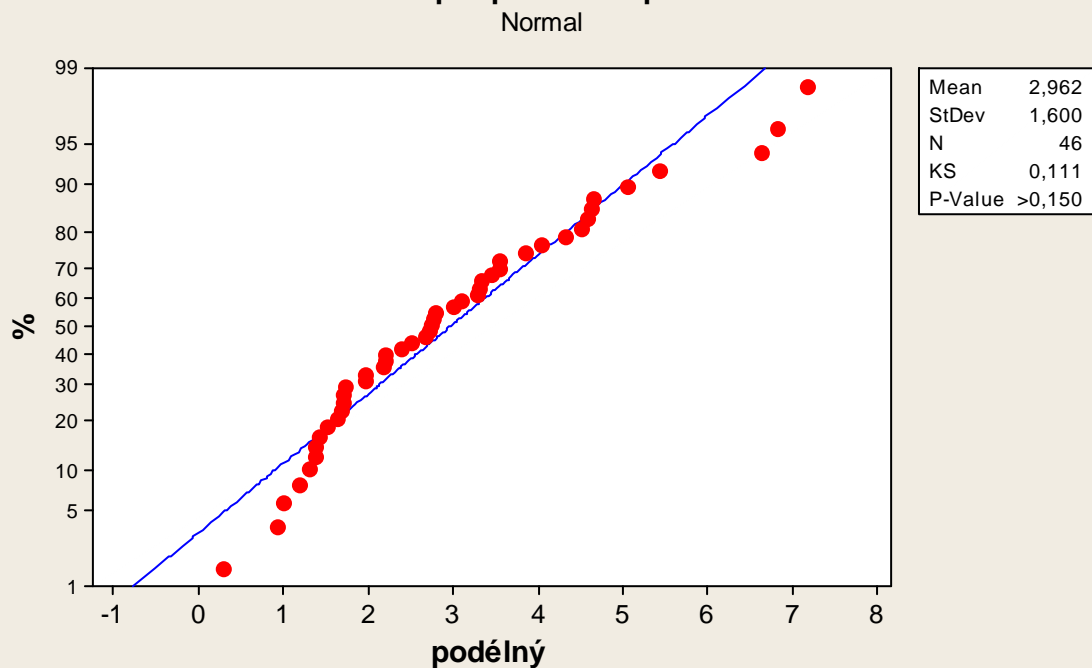
Příloha 1	Testy normálního rozdělení u SD vzorků
Příloha 2	Testy normálního rozdělení u SDS vzorků

Příloha 1

Test normálního rozdělení pro porezitu v příčném řezu u vzorků SD

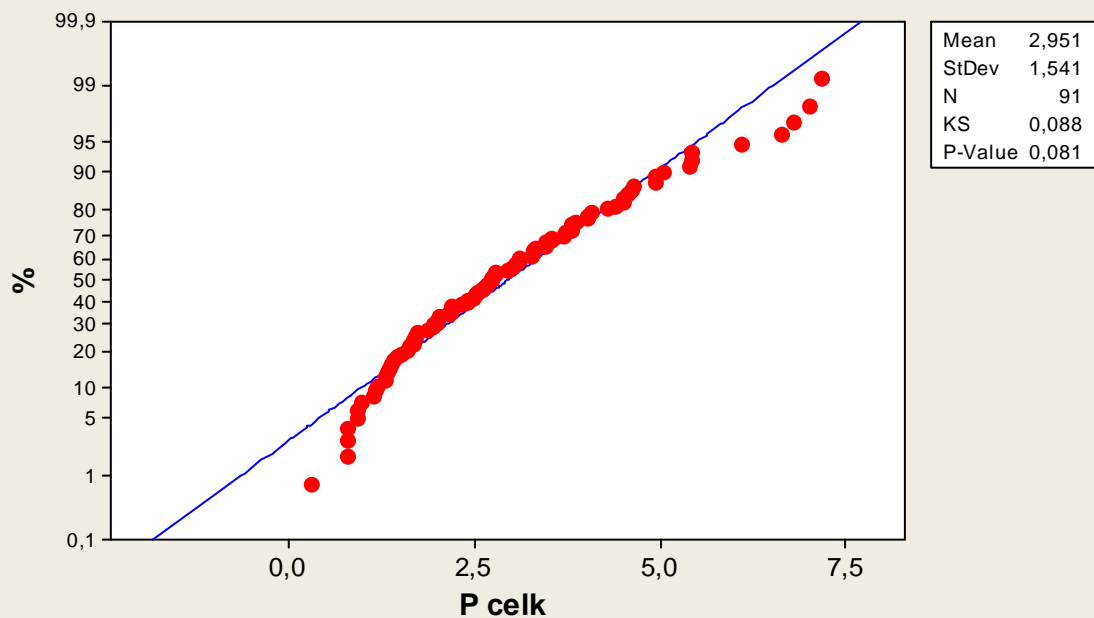


Test normálního rozdělení pro porezitu v podélném řezu u vzorků SD

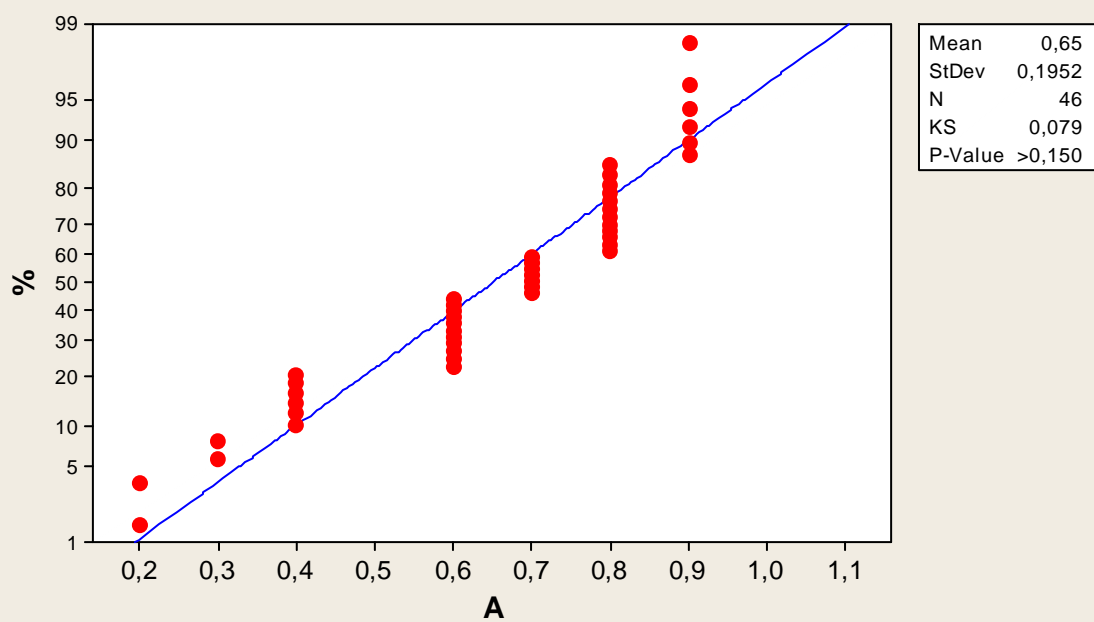


Test normálního rozdělení pro celkovou porezitu u vzorků SD

Normal

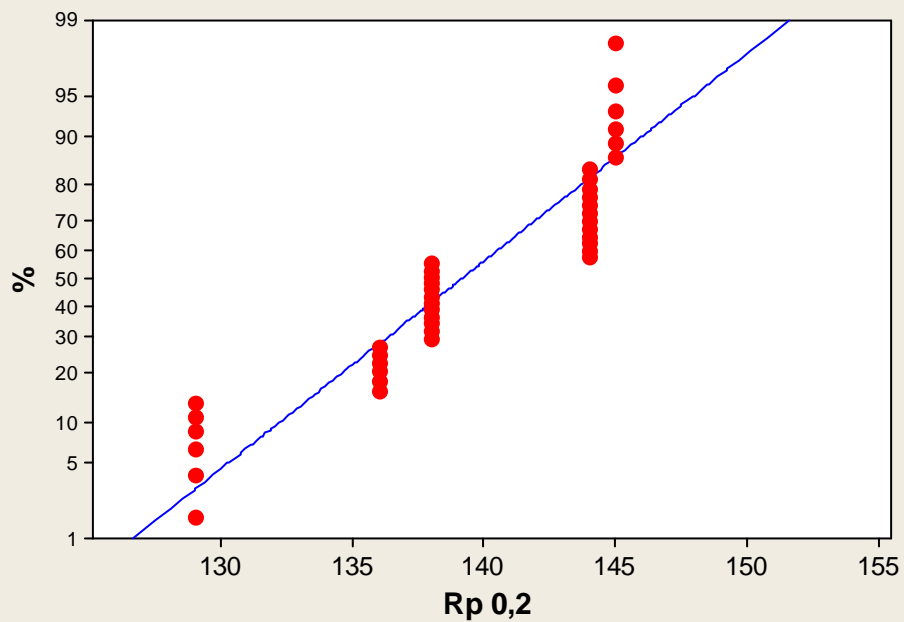
**Test normálního rozdělení pro A u vzorků SD**

Normal

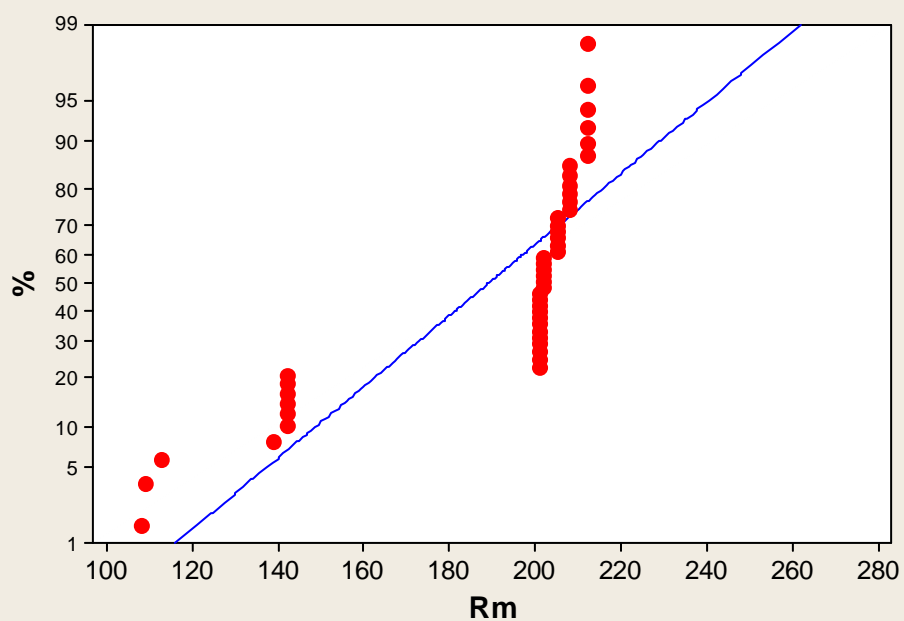


Test normálního rozdělení pro $R_{p0,2}$ u vzorků SD

Normal

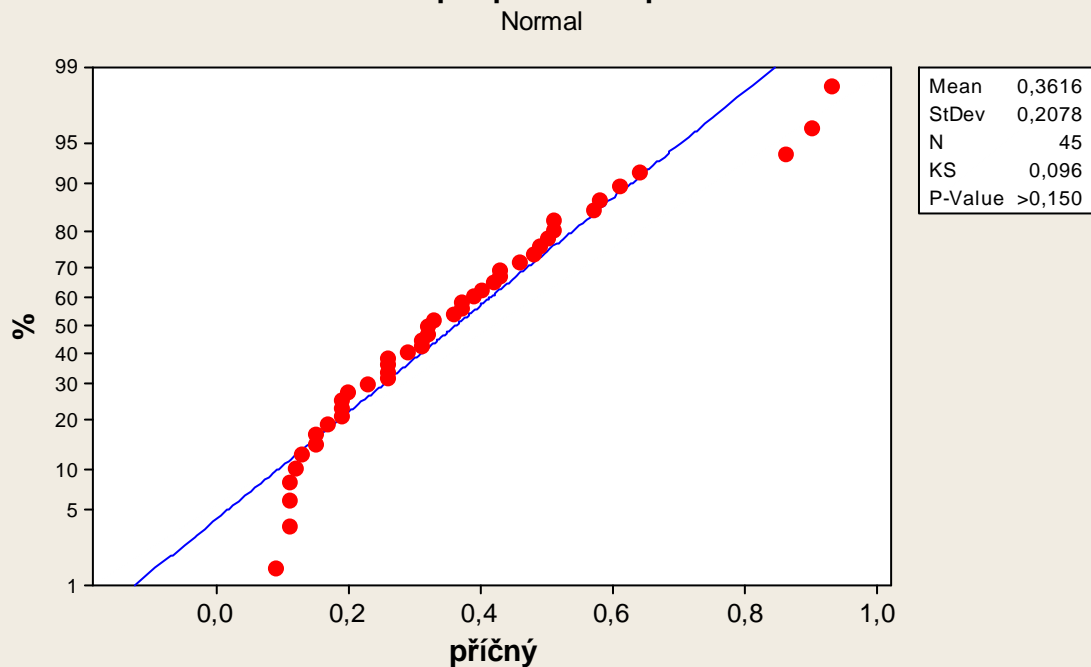
Test normálního rozdělení pro R_m u vzorků SD

Normal

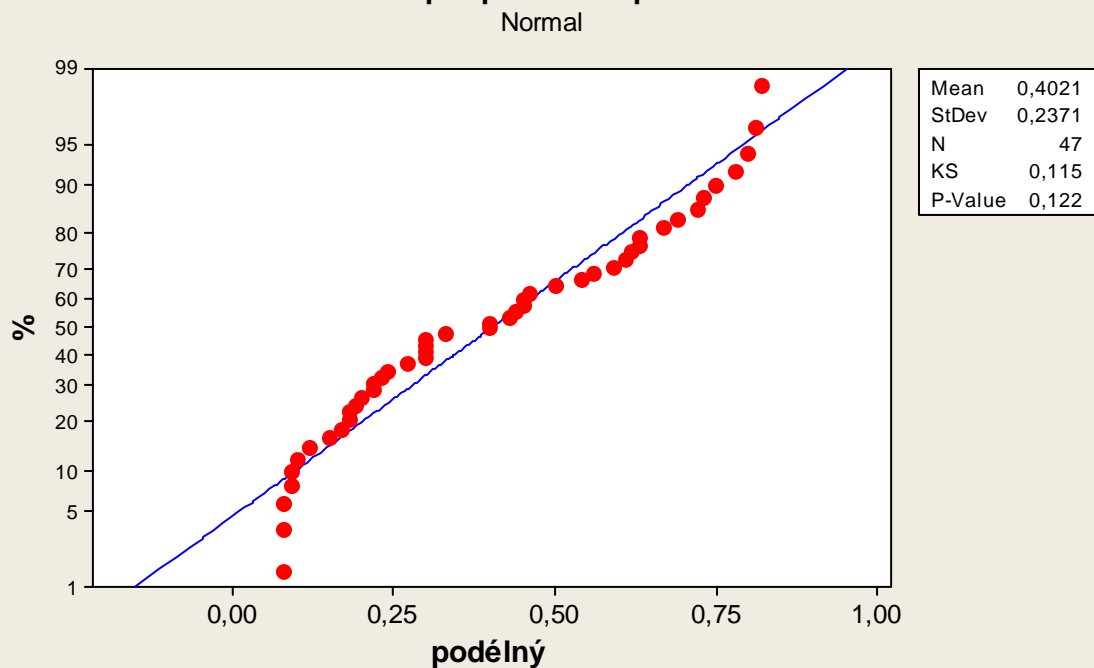


Příloha 2

Test normálního rozdělení pro porezitu v příčném řezu u vzorků SDS

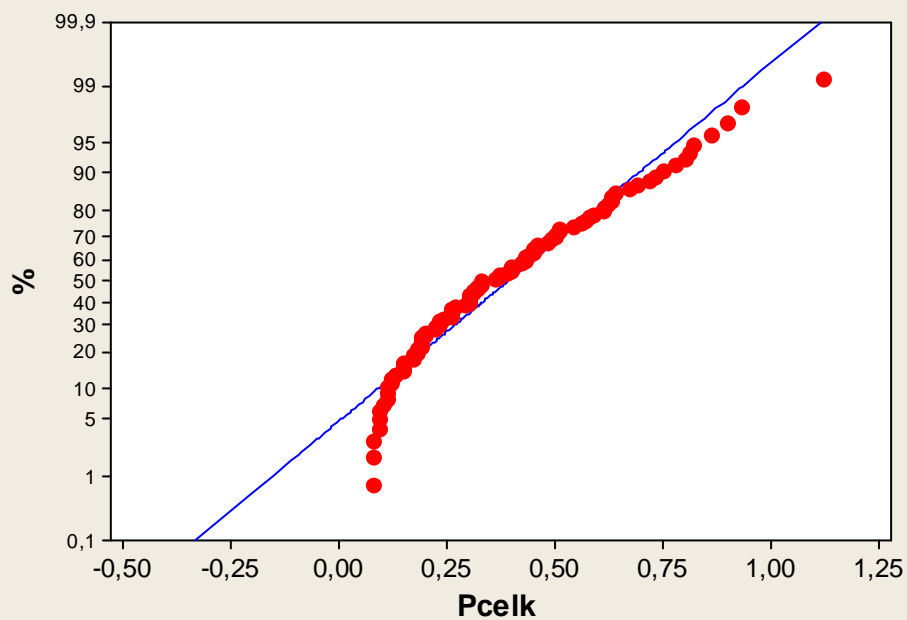


Test normálního rozdělení pro porezitu v podélném řezu u vzorků SDS

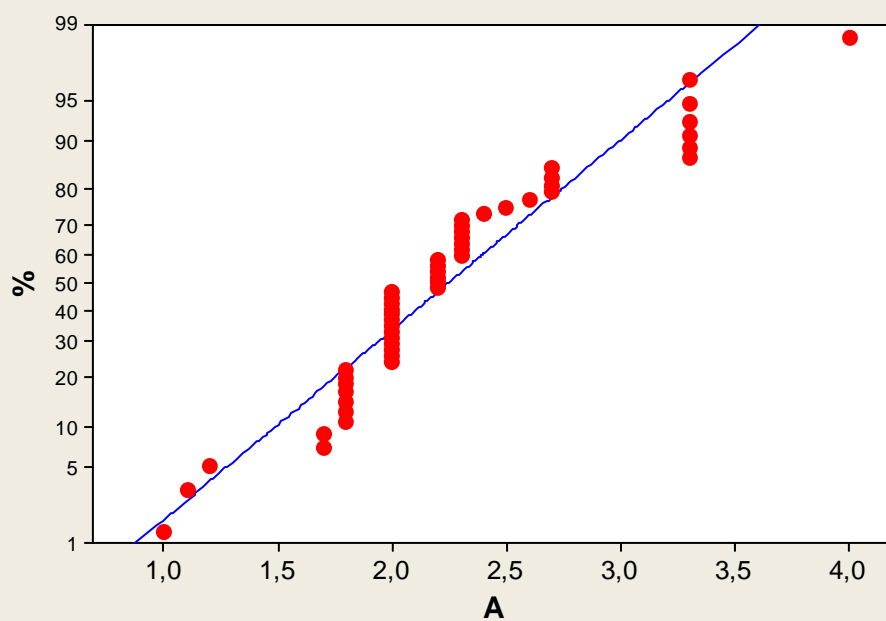


Test normálního rozdělení pro celkovou porezitu u vzorků SDS

Normal

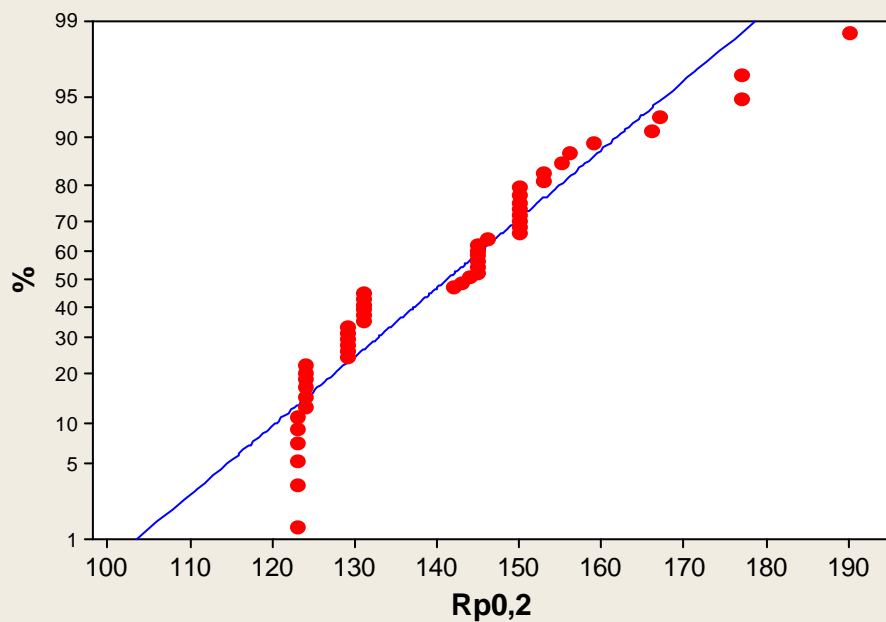
**Test normálního rozdělení pro A u vzorků SDS**

Normal



Test normálního rozdělení pro $R_{p0,2}$ u vzorků SDS

Normal

**Test normálního rozdělení pro R_m u vzorků SDS**

Normal

